

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

SANNA-MARI PELTOLA

**KERROSTALOMODUULIEN TUOTANTOKONSEPTIN
SUUNNITTELU**

Diplomityö

Prof. Kalle Kähkönen ja Lehtori Ilkka Kouri on hyväksytty tarkastajaksi tuotantotalouden ja rakentamisen tiedekunnan kokouksessa 3.4.2013.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tuotantotalouden koulutusohjelma

PELTOLA, SANNA-MARI: Kerrostalomoduurien tuotantokonseptin suunnittelu

Diplomityö, 107 sivua, 32 liitettä (21 sivua)

Elokuu 2013

Pääaine: teollisuustalous

Tarkastajat: professori Kalle Kähkönen ja lehtori Ilkka Kouri

Avainsanat: Moduulituotanto, teollinen rakentaminen, tehdassuunnittelu, tuotantojärjestelmä, virtaava tuotanto, läpäisy aika

Teollisessa rakentamisessa pyritään tehostamaan rakennusprosessia muilta teollisuudenaloilta tutuin keinoin ja näin parantamaan laatua, pienentämään kustannuksia ja lyhentämään rakennusaikoja. Moduulituotantoprosessissa ei ole toistaiseksi onnistuttu saavuttamaan teollisen rakentamisen tarjoamia kilpailuetuja. Diplomityön tavoitteena on suunnitella teollisen rakentamisen moduulikokoonpanoon tuotantokonsepti, joka lyhentää tuotannon läpäisyajoja ja parantaa kustannustehokkuutta. Työn teorian ensimmäisessä osassa tarkastellaan tehdassuunnitteluun liittyviä viitekehyksiä ja luodaan näiden pohjalta tässä työssä käytettävä tuotantokonseptin suunnitteluprosessi. Toinen osuus käsittelee teollista rakentamista, ja sen perusteella määritellään työn suunnitteluprosessissa painotettavat aihe-alueet ja kriteerit. Työn empiirinen osuus perustuu suomalaisen yrityksen moduulituotannossa tehtyyn työntutkimukseen, jonka perusteella määritellään moduulituotantoprosessin vaiheet. Tämän jälkeen kehitetään vaihtoehtoisia tuotantojärjestelmämalleja moduulituotantoon, vertaillaan niitä, esitetään suositeltava ratkaisuvaihtoehto ja tulevaisuuden kehitysvision moduulituotantoon.

Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että teollisen rakentamisen tulisi pohjautua mieluummin teolliseen tuotantoon kuin perinteiseen rakennusteollisuuteen. Rakennusmoduulituotannossa tavoiteltavaa on joustavuus, prosessin virtaus, yhtenäiset toimintamallit, hukan minimointi, materiaalinhallinnan tehokkuus ja kehityksen tukeminen. Teollisen rakentamisen ympäristössä on kuitenkin tärkeää huomioida tuotteen monimutkaisuus ja vahvassa asemassa olevat rakentamisen perinteet ja niihin liittyvä kulttuuri, joka vaikuttaa työntekijöihin ja asiakkaisiin. Havaintojen pohjalta kehitetyt ratkaisuvaihtoehdot pyrkivät muuttamaan paikkakokoonpanoon perustuvaa tuotantoa kohti linjamaista tuotantoa. Ratkaisuvaihtoehdot ovat perinteinen, osakokoonpanoihin perustuva, työntekijöiden virtauttamiseen perustuva ja rinnakkaisia työasemia sisältävä tuotantolinja. Suositeltu ratkaisuvaihtoehto on tuotantolinja, joka sisältää rinnakkaisia työasemia kriittisiä työvaiheita varten. Se lyhentää läpäisyajoja, tukee yhtenäisten toimintamallien luomista, mahdollistaa tuotevariaation joustavuudellaan, on muutoskykyinen ja tukee tuotantoprosessin kehitystä. Pidemmällä tähtäimellä tuotantoprosessin kehityksessä suositellaan pyrkimään moduulikokoonpanon komponenttien integraatioasteen kasvattamiseen, työmenetelmien vakiointiin ja tuotantoteknologioiden käyttöönottoon.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Industrial Engineering and Management

PELTOLA, SANNA-MARI: Planning of Production System for Modular Housebuilding

Master of Science Thesis, 107 pages, 32 appendices (21 pages)

August 2013

Major: Industrial Management

Examiners: Professor Kalle Kähkönen and Assistant Professor Ilkka Kouri

Keywords: Modular production, offsite construction, factory planning, production system, production flow, lead time

The aim of offsite construction is to improve production process and efficiency within construction industry. The main advantages of offsite construction are quality improvement, reduction of manufacturing costs and reduction of construction time. However, the competition advantages are not fully reached in modular production. The target of this master's thesis is to develop a production system that promotes reduction of lead times and improves cost efficiency in modular housebuilding. The first theoretical section covers factory planning frameworks. Based on that, a planning process used in this thesis is created. The second part deals with offsite construction and research about implemented projects. The focus areas used in this thesis is based on part two. The empirical section is based on a work study carried out in modular production floor of a Finnish modular construction company. The work study results are used to define the modular production process. After that, by combining theoretical and empirical studies, different kinds of production system options are created, options compared and some future proposals for action presented.

Literary research inclined that planning and implementing offsite construction should be based rather on manufacturing principles than construction principles. In modular production flexibility, process flow, waste minimizing, effective material handling and continuous improvement should be pursued. Another important finding was that the traditional construction culture has a big impact on the workers and customers and therefore has to be taken into account, as well as the complexity of the product. The options created in this master's thesis aim at changing previous batch production system to more line-like production process. The options are traditional, subassembly based, worker flow based and parallel workstations containing production lines. The recommended option is a production line which also includes parallel work stations for critical tasks. It enables decreasing lead time, creating standard operation models, product variation by flexibility, improving production process and is adaptable. In long term it is suggested to focus on increasing the content integration of elements used, standardization of work methods and increasing use of production technologies in modular production.

ALKUSANAT

Tämä diplomityöprosessi sai alkunsa loppusyksystä 2012 ja on sisältänyt paljon matkustamista sekä monenlaisia vaiheita epätoivon hiipimisestä todelliseen onnistumisen tunteeseen. Tässä vaiheessa olo on toisaalta helpottunut, mutta toisaalta haikea, eräs vaihe elämässä on tulossa päätökseen.

Haluan kiittää NEAPO Oy:tä ja sen henkilöstöä hienosta mahdollisuudesta ja tuesta tämän diplomityön toteuttamisessa. Minut otettiin avoimesti vastaan yrityksessä ja sain nopeasti vastauksia kysymyksiini. Erityiskiitokset haluan osoittaa Jarmo Lampiselle, joka tuki ja ohjasi minua läpi työni. Hän uskoi minuun ja antoi neuvoja jo ennen kuin hänet nimettiin ohjaajakseni. Haluan kiittää suuresti myös Carl Hietalaa, joka perehdytti minut moduulituotantoon ja piristi pitkinä talvisina matkustuspäivinä. Lisäksi haluan kiittää moduulituotannossa työskennelleitä työnjohtajia ja työntekijöitä avoimesta suhtautumisesta sekä vastauksista havainnoinnin aikana suoritettuun työntutkimukseen.

Suuri kiitos kuuluu työn tarkastajille professori Kalle Kähköselle ja lehtori Ilkka Kourille. Heidän arvokas tuki, neuvot ja ohjeet ovat olleet tämän työn valmistumisen edellytys. Kalle toimi alkukontaktina NEAPOon ja ohjaajana teollisen rakentamisen osalta. Ilkka taas ohjasi minua tuotantoon, tutkimuksen tekemiseen ja kirjalliseen esitykseen liittyvissä asioissa.

Olen kiittollinen perheestäni, joka on koko elämäni ja opintojeni ajan antanut minun itsenäisesti tehdä päätöksiä tulevaisuuteeni liittyen sekä tukenut minua näissä valinnoissa. He muistuttavat minua siitä, että pystyn suoriutumaan vaikeistakin tehtävistä ja tarjoavat täysihoitoisen stressiloman kotona Kuohulla aina sitä kaivatessa. Kiitos kuuluu myös avopuolisolleni Jonnelle, joka on myös diplomityöprosessin aikana ollut tukenani ja turvanani sekä antanut vinkkejä työhöni liittyen. Haluan esittää kiitoksen Ainolle, joka tarjosi tarvittaessa majapaikan matkustaessani sekä työn viimeistelyvaiheessa autta-neille Terhille ja isälleni Markulle. Viimeisenä haluan esittää kiitokseni myös opiskelijakavereilleni, jotka ovat toimineet vertaistukena koko opiskelujen ajan. Monista on tullut toivottavasti elinikäisiä ystäviäni.

Diplomityön tästä versiosta on luottamuksellisuuden vuoksi poistettu yritykselle tärkeitä tietoja.

Helsingissä 31. heinäkuuta 2013

Sanna-Mari Peltola

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	i
ABSTRACT	ii
ALKUSANAT.....	iii
SISÄLLYS	iv
TERMIT	viii
1. JOHDANTO.....	1
1.1. Aihe-esittely ja tutkielman tausta	1
1.2. Tutkimusongelma, -tavoitteet ja rajaukset	1
1.3. Tutkimusmenetelmä	3
1.4. Työssä tarkasteltava moduulirakennuskonsepti	4
1.4.1. NEAPO Oy	4
1.4.2. NEAPON moduulirakennuskonsepti	4
2. TEOLLISEN TUOTANTOKONSEPTIN SUUNNITTELU.....	6
2.1. Tehdassuunnittelu	6
2.2. Keskeiset termit	7
2.2.1. Tuotantoprosessin suunnittelu.....	7
2.2.2. Läpäisy aika	8
2.3. Layout.....	9
2.3.1. Layout-mallit	9
2.3.2. Layoutin merkitys.....	10
2.3.3. Suunnitteluprosessi	11

2.3.4.	Suunnitteluprosessin vaiheet.....	14
2.4.	Tutkimuksen perustana käytettävät suunnittelumenetelmät	21
3.	TEOLLINEN RAKENTAMINEN	25
3.1.	Rakentamisen erityispiirteet perinteiseen tuotantoon verrattuna	25
3.2.	Rakentamisen teollistuminen.....	25
3.2.1.	Teollistuminen	26
3.2.2.	Rakentamisen teollistuminen.....	26
3.2.3.	Teollisen rakentamisen etuja, haittoja ja ongelmia	27
3.2.4.	Esivalmistuksen tasot.....	29
3.2.5.	Teollisen rakentamisen eri asteet.....	31
3.3.	Lean rakentaminen.....	33
3.4.	Modulaarinen rakentaminen	34
3.4.1.	Modulaarinen rakennus	34
3.4.2.	Rakennusmoduulitehtaan suunnittelu.....	35
3.5.	Käytännön esimerkkejä tehdasrakentamisesta	38
3.5.1.	Japanilainen talotehdasmalli	38
3.5.2.	NCC Komplett	41
3.6.	Tutkimus teollisen rakentamisen kokemuksista	42
3.7.	Tutkimuksessa käytettävät painotusalueet ja kriteerit.....	48
4.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO.....	54
4.1.	Tutkimusmetodologia.....	54
4.2.	Työssä käytetty moduulituotantokonseptin suunnittelumalli	55
4.3.	Työntutkimus tuotantoprosessin määrittelyssä	56
4.4.	Tutkimustulosten oikeellisuus	58
4.5.	Kerätyn tiedon analysointi.....	60

5. MODUULITUOTANTO KOHDEYRITYKSESSÄ JA VERROKKIYRITYKSISSÄ	61
5.1. Tuotantoprosessi	61
5.1.1. Tuote	61
5.1.2. Tuotantoprosessi ja työvaiheet	61
5.1.3. Tuotantoaikataulu ja läpäisyajat	63
5.1.4. Moduulituotannon kustannukset	64
5.1.5. Tavaroiden toimitukset ja varastonhallinta	64
5.1.6. Urakoitsijoiden hallinta	65
5.1.7. Suunnittelu ja aikataulutus	66
5.1.8. Tuotannolliset tavoitteet tulevaisuudessa	66
5.2. Nykyisen tuotannon vahvuuksia	66
5.3. Linjatuotantoon siirtymisen haasteet	67
5.4. Havainnot verrokkiyrityksissä	67
5.4.1. Siirtotekniikat	67
5.4.2. Varioituvan tuotantolinjan materiaalinjakelu ja tasapainotus ..	68
6. TUOTANTOJÄRJESTELMÄVAIHTOEHTOJEN KEHITTÄMINEN	69
6.1. Kriteerit ja lähtökohdat ratkaisulle	69
6.1.1. Ratkaisun rakenne	69
6.1.2. Tuotannon kapasiteetti	70
6.1.3. Ratkaisun tavoitteet	70
6.2. Talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttävän layoutin suunnittelu tehtaalle	74
6.2.1. Perinteiseen kokoonpanolinjaan perustuva layout	74
6.2.2. Osakokoonpanoihin perustuva layout	77

6.2.3. Työntekijöiden ja -välineiden virtauttamiseen perustuva layout..	77
6.2.4. Linjakokoonpano, jossa myös rinnakkaisia asemia	78
6.3. Työasemien työtehtävien ja materiaalikäsittelyn organisointi	78
6.4. Moduulikokoonpanon tasapainotus ja aikataulutus	84
6.5. Vaihtoehtojen vertailu	89
7. EHDOTUS MODUULITUOTANTOON SOPIVASTA TUOTANTOJÄRJESTELMÄSTÄ	95
7.1. Ehdotettu tuotantojärjestelmä	95
7.2. Moduulikokoonpanon tulevaisuus.....	97
7.2.1. Rakennusmoduulituotantoprosessin kehittäminen	97
7.2.2. Moduulin myöhäistetty koonti	98
7.3. Toimenpide-ehdotukset	99
8. JOHTOPÄÄTÖKSET	100
8.1. Suositukset liikkeenjohdolle	100
8.2. Tulosten arviointi	100
8.3. Tieteelliset havainnot	102
8.4. Huomioita tutkimuksen tekemisestä ja jatkotutkimuskohteet	103
LÄHTEET	104
LIITTEET (32 kpl).....	

TERMIT

Benchmarking	Oman toiminnan vertaaminen toisten toimintaan.
Joustavuus	Ominaisuus, jolla tarkoitetaan kykyä mukautua ympäristön muutoksiin.
Layout	Työkoneiden ja -asemien sekä tuotteiden sijoittelu tuotantotiloissa.
Moduuli	Suurtilaelementti, joka voidaan työmaalla liittää osaksi rakennusta.
Moduulituotanto	Rakennusmoduulien valmistus tehdasympäristössä.
Perinteinen rakentaminen	Täysin työmaalla tapahtuva rakentaminen.
Tasapainotus	Tuotantolinjan tasapainotuksella viitataan työkuorman tasapainottamiseen työasemien välillä. Lisäksi tasapainotuksella voidaan tasata tuotevariaatiosta johtuvia työkuorman vaihteluja.
Teollinen rakentaminen	Teollisia prosesseja, kuten tehdas- tai esivalmistusta, hyödyntävää rakentamista.
Teollinen tuotanto	Tehtaassa tapahtuva tuotantoteknologisia ratkaisuja hyödyntävä tuotanto.
Tuotantojärjestelmä	Alakäsite, jolla viitataan tuotantokonseptin fyysistä tuotantoympäristöä käsittelevään osaan.
Tuotantokonsepti	Yläkäsite, jolla viitataan tässä työssä suunniteltavaan konseptiin yleisellä tasolla.

1. JOHDANTO

1.1. Aihe-esittely ja tutkielman tausta

Rakennusallalla teollistuminen on ollut hitaampaa kuin muilla teollisuudenaloilla ja rakennusteollisuudesta onkin tullut työvoimaa sitovin teollisuudenala (Girmscheid & Scheublin 2010, s. vii). Teollisen rakentamisen keinot tarjoavat mahdollisuuden kustannussäästöihin, rakentamisen laadun parantumiseen ja rakennusaikojen huomattavaan lyhentymiseen (Girmscheid 2010, ss. 12–13). Tästä huolimatta teollinen rakentaminen ei ole yleistynyt odotusten mukaisesti (Nadim & Goulding 2011, s. 82). Syitä tähän on tutkittu ja yhdeksi syyksi onkin epäilty teollisen rakentamisen tuotantoa, jossa ei olla vielä onnistuttu saavuttamaan kustannusetuja (Koskela, 2003).

Tämän työn tutkimuskohteena toimii modulaariseen uudis- ja korjausrakentamiseen erikoistunut NEAPO Oy. NEAPO Oy pyrkii tuomaan innovatiivisia ratkaisuja rakennusteollisuuteen ja hakemaan kilpailuetua teollisesta moduulirakentamisesta. NEAPO Oy:n asuinkerrostalot koostuvat moduuleista, jotka valmistetaan sisätiloissa ja toimitetaan rakennustyömaalle kokonaisina asuntoina yhteen koottaviksi. Tähän mennessä moduulit on valmistettu projektiluonteisesti, eikä vakiintunutta toimintamallia tuotantoon ole ollut. Tämän takia rakennustyömaat ovat ajoittain seisseet jopa viikkoja, sillä moduuleita ei ole saatu tuotettua haluttuun tahtiin. NEAPO Oy:n tavoitteena on saavuttaa moduulikerrostalon tuotantoprosessi, joka etenee häiriöttä suunnittelusta rakennuksen käyttöönottoon asti. Tämän saavuttamiseksi tuuleekin kehittää moduulikokoonpanoa niin, että moduuleita voidaan tuottaa samaa tahtia kuin työmaalla asentaa. (Wegelius 2012)

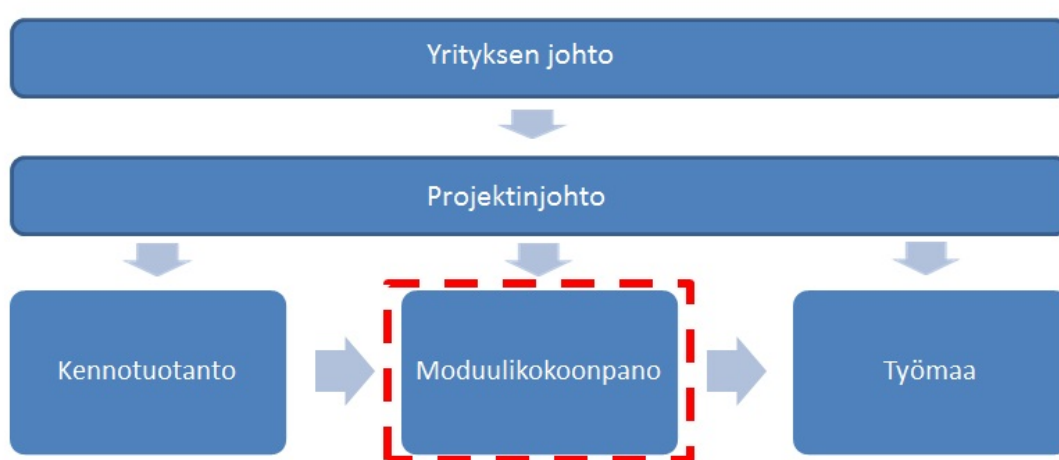
1.2. Tutkimusongelma, -tavoitteet ja rajaukset

Tässä diplomityössä on tarkoitus kehittää moduulituotantokonseptia ja suunnitella siihen sopiva tuotantojärjestelmä. Diplomityön päätutkimusongelmana onkin: *Millainen moduulikokoonpanon tuotantojärjestelmän tulisi olla?* Tutkimusongelmasta voidaan muodostaa työn alatavoitteita, jotka ovat seuraavat:

1. Varioituvan rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmän ominaisuuksien määrittely
2. Talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttävän layoutin suunnittelu tehtaalle
3. Työasemien työtehtävien ja materiaalikäsittelyn organisointi tehokkaasti, hukkia minimoiden
4. Moduulikokoonpanon tasapainotus ja aikataulut

Tässä diplomityössä tutustutaan NEAPO Oy:n moduulikokoonpanoon ja sen työvaiheisiin. Tavoitteena on luoda suunnitelma siitä millainen moduulikokoonpanolinjan tulisi olla, jotta moduulien läpäisyaikaa saataisiin lyhennettyä ja tuottavuus maksimoitua.

Tämä työ käsittelee NEAPO Oy:n rakentamia moduulikerrostaloja. Moduulirakennuksen toimitusprojekti voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka ovat suunnittelu, moduulituotanto ja rakennustyömaa. Modulaarisen kerrostalotuotantoprosessin osalta tässä työssä keskitytään moduulituotantoon, jossa tapahtuu moduulien kokoonpano. Moduulin rakenteen muodostavien kennojen valmistus ja moduulien kuljetus sekä kokoaminen työmaalla on rajattu tämän työn käsittelystä pois. Moduulikerrostalon valmistusprosessin osalta tässä työssä käytettävä raja on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Diplomityön raja: Moduulikerrostalon valmistusprosessi

Yrityksen eri toimintojen välistä yhteistyötä ei tässä työssä tarkastella. Näin ollen esimerkiksi moduuliasuntojen suunnittelu ei varsinaisesti kuulu rajauksen sisään. Työssä kuitenkin oletetaan, että suunnittelun laatu vaikuttaa tuotannon tehokkuuteen ja näiltä osin suunnittelutoiminnan osiin viitataan. Myöskään projektinjohtoa tai yrityksen johtoa ei tässä työssä käsitellä.

Työssä keskitytään moduulikokoonpanoon ja sen suunnitteluun konseptitasolla. Päähuomio työssä on kokoonpanoprosessin etenemisessä, työntekijöiden sijainneissa ja materiaalivirroissa. Työvaiheiden jakoa työasemille on käsitelty, mutta yksittäisiin työvaiheisiin ei ole kiinnitetty huomiota. Tämänhetkisen valmistusprosessin osien soveltuvuus uuteen tuotantojärjestelmään on huomioitu, rajaten kuitenkin yksityiskohtaiset valmistustekniset asiat käsittelystä pois. Alihankkijoiden tai toimittajien valintaprosessia ei työssä myöskään käsitellä. Logistiikka ja varastohallinta eivät varsinaisesti kuulu tutkimuksen rajauksen piiriin, mutta ne on huomioitu layoutin suunnittelussa ja materiaalinjakelussa.

Työn lähtökohtina ovat toimineet tutkimukset alussa tehdyt oletukset, jotka on johdettu yrityksen tavoitteista. Työssä on käytetty tuotantovolyymin raja-arvoina 250–500 moduulia vuodessa. Tämä on tulevan kennotuotantolinjan tavoitevolyyymi linjan toimiessa yhdessä työvuorossa. Lisäksi on oletettu, että kennotuotantolinja on kokoonpanon yhteydessä. Tärkeinä moduulikokoonpanoa ohjaavina tekijöinä on pidetty myös esimerkiksi ajallisesti rajoittavia työvaiheita ja tuotevariaation mahdollistamista.

1.3. Tutkimusmenetelmä

Tämä diplomityö edustaa soveltavaa tutkimusta, jonka tutkimusmenetelmänä on yksittäinen tapaustutkimus, jossa on yhdistetty olemassa olevaa teoriaa ja aikaisempia kokeimuksia käsiteltävään tapaukseen. Tutkimuksen pohjana on käytetty kirjallisuuskatsausta sekä kohdeyrityksessä suoritettua havainnointia ja datan keräystä, jolla on tärkeä rooli tutkimuksessa. Tutkimusmenetelmä on kuvattu tarkemmin luvussa 4.

Työssä on käytetty aineistona kirjallisuutta ja perusteorioita liittyen tehdas- ja tuotantolinjasuunnitteluun. Lisäksi teoriaosuutta on täydennetty ja ajankohtaistettu tieteellisillä artikkeleilla ja muilla viimeaikaisilla julkaisuilla. Tehdassuunnitteluteorian pohjalta on johdettu tässä työssä käytettävä tuotantokonseptin suunnitteluprosessi. Teollisen rakentamisen teoriaosuuden osalta päälähteenä on käytetty artikkeleita ja seminaari- sekä projektijulkaisuja. Näiden pohjalta on johdettu suunnitteluprosessissa käytettävät painotusalueet ja vaihtoehtojen vertailussa käytettävät kriteerit.

Työn empiirisen tutkimuksen lähtökohtana on toiminut NEAPO Oy:ssä kerätty tieto moduulien kokoonpanopaikalta ja moduulitoimitusten kanssa työskenteleviltä henkilöiltä. Kokoonpanopaikalla on suoritettu työntutkimushavainnointia keräämällä tietoa muun muassa moduulituotantoprosessin työvaiheista, vaiheajoista sekä vastaan tulleista ongelmatilanteista. Lisäksi haastattelut ja palaverien seuranta ovat tarjonneet erilaisia näkökulmia ja asiantuntemusta tutkimuksen pohjaksi. Tutkimuksen aikana on suoritettu myös kaksi benchmarking -käyntiä, joilla keskityttiin raskaiden kappaleiden siirtotekniikkaan sekä varioituvan tuotannon materiaalinjakeluun.

Työssä on ensimmäisenä esitetty sekä tuotantokonseptin suunnitteluun että teolliseen rakentamiseen liittyvää perusteoriaa, jonka pohjalta on luotu tässä työssä käytettävä suunnitteluprosessi. Tämän jälkeen suunnitteluprosessi, sen vaiheet sekä tutkimuksen toteutustavat on kuvattu tutkimusmenetelmät ja -aineisto luvussa. Luvussa 5 on esitelty tutkimuksessa käsiteltävä moduulituotantoprosessi ja havainnoinnin pohjalta tehty analyysi. Luvussa 6 on kehitetty ratkaisuvaihtoehdot tutkimusongelmaan ja suoritettu vaihtoehtojen vertailu. Tämän jälkeen esitetään johtopäätökset ja toimenpide-ehdotukset. Työn lopuksi on esitelty johtopäätökset tutkimuksen onnistumisesta sekä jatkotutkimusmahdollisuuksia.

1.4. Työssä tarkasteltava moduulirakennuskonsepti

Tässä diplomityössä empiirisen osuuden tarkastelukohteena on innovatiivisia modulaarisia rakennusratkaisuja kehittävä ja toimittava NEAPO Oy. Työn tutkimuksellinen osuus perustuu vahvasti NEAPO Oy:n moduulituotantokonseptiin.

1.4.1. NEAPO Oy

NEAPO Oy (myöhemmin NEAPO) on perustettu vuonna 2007. Sen juuret ovat laivanrakennuspuolella, Oy Shippax Ltd:n tytäryhtiönä, josta se eriytettiin omaksi yhtiökseen. NEAPOlla on noin kaksikymmentä omaa työntekijää ja välillisesti se työllistää noin 200 henkilöä. NEAPOn toimistot sijaitsevat Helsingissä ja Uudessakaupungissa. (NEAPOn yleisesittely 2013)

NEAPOn toimintatapa perustuu kustannustehokkuuteen, nopeaan asennukseen ja korkeaan tehdaslaatuun. NEAPO suunnittelee ja toimittaa muun muassa kerrostaloja, lisäkerroksia ja julkisten palvelujen tiloja (esimerkiksi päiväkodit). NEAPOn toimittamat rakennusratkaisut ovat pääosin matalaenergisiä. Lisäksi NEAPO on toimittanut tehdasvalmiita hissitorneja jälki- ja uudisasennettuna. NEAPOn korostamat ominaisuudet tuotteissaan ovat keveys, lujuus, paloturvallisuus, äänieristävyys, korkea laatu ja räätälöity toteutus. (Modulaarinen rakentaminen FIXCEL teräskennoteknologialla 2012)

1.4.2. NEAPOn moduulirakennuskonsepti

NEAPOn moduulirakennuskonsepti perustuu tehtaalla valmiiksi varusteltuihin suurmoduuleihin, jotka kuljetetaan työmaalle yhtenä kappaleena. Moduulien sisätilat viimeistellään kiintokalusteita, kodinkoneita ja talotekniikkaa myöten ja myös julkisivupinnoite voidaan tehdä tehtaalla. Esimerkiksi kerrostalohankkeessa huoneistokohtaiset moduulit liitetään työmaalla nopeasti kokonaiseksi taloksi. (Modulaarinen rakentaminen FIXCEL teräskennoteknologialla 2012)

Suurten kokonaisuuksien kuljetuksen mahdollistama rakenteiden keveys perustuu FIXCEL® teräskennoteknologiaan. FIXCEL® -teräskennoelementit muodostavat rakennuksen kantavan rakenteen, jolloin erillistä runkorakennetta ei tarvita. FIXCEL® -teräskenko on patentoitu rakennusinnovaatio, jonka tuotemerkin NEAPO omistaa. (Modulaarinen rakentaminen FIXCEL teräskennoteknologialla 2012) Kenno valmistetaan noin millimetrin paksuisista kylmämuovatusista teräslevyistä, jotka liitetään toisiinsa muodostamaan 70–200 millimetrin paksuisen elementin (Heinisuo & Lahdenmaa 2013, s. 26). Teräskenko on ominaisuuksiltaan luja, jäykkä, kevyt, korroosiokestävä, paloturvallinen, homeeton ja 100 % kierrätettävä (Modulaarinen rakentaminen FIXCEL teräskennoteknologialla 2012). Teräskennon valmistus tapahtuu Uudessakaupungissa yhteistyössä Oy Shippax Ltd:n kanssa (Sorri & Kähkönen 2013, s. 66).

Moduulirakennuksen toimitusprojekti voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka ovat suunnittelu, moduulituotanto ja rakennustyömaa. Projekti lähtee liikkeelle suunnitteluvaiheesta, joka tapahtuu yhteistyössä arkkitehtiyrityksen ja asiakkaan kanssa. Taloteknistä ja rakennesuunnittelua on teetetty alihankintana. Rakennustyömaavaihe on lyhyempi kuin perinteisessä rakentamisessa, mutta esimerkiksi perustustyöt toteutetaan perinteisen rakentamisen keinoin. Rakennustyömaa kykenisi nykyistä nopeampaan moduulien asennustahtiin, mutta moduulituotannon toimitustahti on ollut rajoittava tekijä. (Sorri & Kähkönen 2013, ss. 66–67) Tämä diplomityö käsittelee moduulituotantoa ja NEAPOn moduulituotantoprosessi on kuvattu luvussa 5.

2. TEOLLISEN TUOTANTOKONSEPTIN SUUNNITTELU

Tuotantokonseptin suunnittelu -teoriaosuus toimii diplomityössä empiirisen suunnittelutyön ohjaavana tekijänä. Tässä luvussa esitellään tehdas- ja layoutsuunnittelussa käytettyjä yleisiä menetelmiä sekä tutustutaan erilaisiin tehdas- ja layoutmalleihin. Suunnittelumenetelmiä sovelletaan tähän työhön sopiviksi ja mallit toimivat pohjana NEAPOLle suunniteltavan konseptin vaihtoehtojen määrittelyyn. Tuotantokonsepti -termillä viitataan tässä työssä konseptin suunnitteluun yleisellä tasolla. Termiä tuotantojärjestelmä taas käytetään kun viitataan tuotantotilojen järjestelyihin konkreettisemmalla tasolla. Luvussa 2.4. on esitetty tämän luvun teorian perusteella tehtyjä päätelmiä.

2.1. Tehdassuunnittelu

Tehdassuunnittelun päätavoitteet tulisi johtaa yrityksen missiosta. Näin tehdassuunnitteluprojektin tavoite on koko yrityksen etuja ajava ja ohjaa yritystä suuntaan, johon se haluaa tulevaisuudessa keskittyä. Alatavoitteilla taas voidaan tarkentaa sitä millaisiin tuloksiin pyritään. Alatavoitteita voi olla esimerkiksi yksikkö- ja projektikustannuksien minimointi, laadun optimointi, työntekijöiden, välineiden, tilan ja energian tehokkaan käytön edistäminen, työntekijöiden mukavuuden ja turvallisuuden mahdollistaminen, projektikustannusten kontrollointi, tuotannonaloituspäivämäärän saavuttaminen, joustavuuden saavuttaminen, liiallisen varaston vähentäminen tai muiden tavoitteiden saavuttaminen. (Stephens & Meyers 2010, ss. 6–7)

Erilaisia tehdassuunnittelutyyppejä voidaan Stephens & Meyersin (2010, ss. 14–15) mukaan luokitella viisi: uusi laitos, uusi tuote, suunnittelumuutos, kustannusten alentaminen ja jälkiasennus. Uusi laitos -tyyppisessä suunnittelussa tehdassuunnittelu aloitetaan alusta asti uusissa tiloissa. Uusi tuote -suunnittelussa tuotantoon otetaan uusi tuote, jonka valmistuslinja tulee kehittää jo olemassa oleviin tiloihin vanhojen tuotteiden tuotannon yhteyteen. Suunnittelumuutos -suunnitelma tehdään tilanteissa, joissa tuotteen suunnittelussa tapahtuu muutos laadun parantamiseksi tai kustannusten pienentämiseksi. Tämä saattaa aiheuttaa muutoksia tehtaassa ja vaatii siksi ainakin tehdassuunnittelijan käyvän muutoksen läpi. Kustannusten alentaminen -suunnitelmassa on tavoitteena löytää tehtaalle parempi layout, jotta saavutetaan kustannussäästöjä. Jälkiasennus -suunnittelussa vanhat tilat ovat käytössä, mutta niihin asennetaan uusia työkoneita ja virtausta suunnitellaan uusiksi. Jälkiasennus -suunnittelun työvaiheet ovat pitkälti samat kuin uusi laitos -suunnittelussa sillä poikkeuksella, että tilat ovat olemassa jo tietynlaisina. (Stephens & Meyers 2010, ss. 14–15)

2.2. Keskeiset termit

Tässä alaluvussa määritellään myöhemmin työssä käytettäviä termejä ja tunnuslukuja, joiden avulla voidaan määritellä, arvioida ja kehittää tuotantoprosessia. Luvussa käsitellään myös läpäisyaikaa ja sen merkitystä tuotantoprosessin kannalta.

2.2.1. Tuotantoprosessin suunnittelu

Kysyntävauhti (takt time) on aika, jonka välein tuotetaan tasaisella tahdilla yksi kappale. Jotta kysyntä täytetään, tulee siis tuotannosta valmistua yksi kappale kysyntävauhdin määrittämin välein. Kysyntävauhti voidaan laskea käyttämällä kaavaa:

$$\text{Kysyntävauhti} = \frac{\text{Tuotantoon käytettävissä oleva aika}}{\text{Kysyntä}},$$

jossa tuotantoon käytettävissä oleva aika ilmaistaan aikayksikkönä ja kysyntä kappalemääräisenä. (Baudin 2002, ss. 42–43)

Tahtiajalla (cycle time) tarkoitetaan enimmäisaikaa, joka voidaan työskennellä yhden kappaleen parissa yhdellä työasemalla. Mikäli työhön kuluva aika jollakin asemalla kasvaa suuremmaksi kuin tahtiaika, tulee tästä asemasta pullonkaula. Tahtiaika voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Tahtiaika} = \frac{1}{\text{tuotantomäärä}},$$

jossa tahtiaika esitetään tunneissa per kappale ja tuotantomäärä kappaleissa per tunti. (Krajewski et al. 2010, s. 296)

Huomattavaa on, että kysyntävauhti ja tahtiaika eivät ole sama asia. Kysyntävauhtia käytetään tuotannonsuunnitteluvaiheessa, kun lasketaan kuinka usein *tulisi* tuottaa valmiita kappaleita asiakkaiden vaatimusten täyttämiseksi. Tahtiaika taas kuvaa suorituskykyä, kuinka usein työasema saa työn päätökseen yhden kappaleen osalta. Ideaalitilanteessa tahtiajat ja kysyntävauhti ovat hyvin lähellä toisiaan. (Lovellette 2001, s. 32)

Työntekijöiden vähimmäismäärä voidaan laskea käyttämällä kaavaa (Baudin 2002, s. 50):

$$\text{Työntekijöiden vähimmäismäärä} = \frac{\text{Kokonaiskokoonpanoaika yhdelle kappaleelle}}{\text{Kysyntävauhti}}$$

Hukka-aika on yhteenlaskettu ei-tuottava aika kaikilla työasemilla kappaleen valmistuksen aikana. Se voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Hukka} - \text{aika} = nc - \Sigma t,$$

jossa n on työasemien määrä, c on tahtiaika ja Σt kokonaisstandardiaika, joka vaaditaan yhden kappaleen kokoonpanoon. (Krajewski et al. 2010, s. 296)

Tehokkuudella tarkoitetaan tuottavan ajan osuutta kokonaisajasta (Krajewski et al. 2010, s. 297):

$$\text{Tehokkuus (\%)} = \frac{\Sigma t}{nc} (100)$$

Tasapainotushukka on osuus, jonka tehokkuus jää täydestä sadasta prosentista (Krajewski et al. 2010, s. 297):

$$\text{Tasapainotushukka (\%)} = 100 - \text{Tehokkuus}$$

Kokoonpanotyössä esiintyy monentyyppistä hukkaa: ylituotanto, odotusajat, kuljetus, prosessi, liikavarasto, liike ja viallisten tuotteiden tuotanto. Hukan poistaminen kokoonpanoprosessista ei ole helppoa, koska sitä esiintyy kautta koko prosessin. Tarvitaankin kokoonpanoprosessin eri vaiheiden yksityiskohtaista analysointia, jotta voidaan havaita hukan lähteet. Pitkissä kokoonpanoprosesseissa tämä saattaa olla hyvin vaivalloista, mutta hukan ennaltaehkäisy jo suunnitteluvaiheessa edesauttaa välttämään tai vähentämään hukan syntyä. (Baudin 2002, ss. 11–13)

2.2.2. Läpäisy aika

Läpäisyajalla tarkoitetaan aikaa prosessin tai projektin aloituksesta tulosten saantiin. Käytännössä tuotantoympäristössä tämä tarkoittaa asiakkaan tekemän tilauksen ja tilauksen toimituksen välistä ajanjaksoa. (Wadhwa et al. 2005, s. 3135) Tuotannon läpäisy aika taas kertoo ajan tuotannon aloituksesta tuotteen valmistumiseen. Se koostuu suoritussajasta, asennusajasta, liikuttamisajasta, jonotusajasta, materiaalien odotusajasta ja liikuttamisen odotusajasta (Hopp et al. 1990, s. 80).

Hopp et al. (1990, s. 78) tutkivat tuotannon läpäisyajoja eri yrityksissä ja havaitsivat, että hyvin usein tuotannon läpäisyajasta vain murto-osa kuluu varsinaiseen tuotteen työstämiseen. Kirjoittajien mukaan tietyt yritykset olivat onnistuneet kuitenkin lyhentämään tuotannon läpäisyajoja viikoista ja kuukausista tunteihin ja päiviin. Artikkelissa todettiin, että tuotannon läpäisyajan lyhentämisestä on tulossa kilpailuetu. (Hopp et al. 1990, s. 78)

Lyhyemmän läpäisyajan etuja voidaan tarkastella esimerkiksi myynnin ja tuotannon näkökulmasta. Myynnin näkökulmasta lyhyt läpäisy aika antaa mahdollisuuden tarjota tuotetta asiakkaille lyhyemmällä toimitusajalla, minkä lisäksi se vähentää peruutettujen tilausten vaikutusta tuotantoon ja vähentää ennusteiden teon tarvetta. Tuotannon näkökulmasta taas lyhyt läpäisy aika parantaa työn laatua, kun valmistuksen ja lopputarkastuksen välinen aika lyhenee. Lyhyt läpäisy aika vähentää keskeneräisen tuotannon määrää ja suunnittelumuutoksista johtuvia valmistuksen häiriöitä. Se lyhentää myös valmis-

tuksen sidottua ja helpottaa koko tuotannon johtamista, kun on vähemmän työtä jota seurata. Kuitenkin on tärkeää huomioida, että läpäisyajan lyhentämisen hyödyt saavutetaan vain jos siihen pystytään ilman liiallisia uhrauksia muilla alueilla, kuten laadussa tai tuotantokyvyssä. (Hopp et al. 1990, s. 78)

Hopp et al. (1990) korostavat, että läpäisyaikaa voidaan lyhentää myös käyttämällä yksinkertaisia ja halpoja menetelmiä. Tällöin tulee kiinnittää huomioita läpäisyaikaa pienentäviin ongelmiin. Heidän menetelmänsä läpäisyajan lyhentämiseksi on jaettu viiteen osa-alueeseen: etsi keskeneräinen tuotanto, pidä asiat liikkeessä, synkronoi tuotanto, tasoita työvirta ja poista vaihtelevuus. Keskeneräisen tuotannon etsimisellä viitataan tuotannossa olevien tuotteiden lukumäärään, jonka tulee olla optimoitu kustannusten sitomisen ja toisaalta varmuusvarastojen suhteen. Asioiden pitämisellä liikkeessä viitataan ideaan, jonka mukaan tuotannon läpäisy aika ja varastot pienenevät mikäli tuote liikkuu koko ajan kohti valmistumistaan. Tuotannon synkronoinnilla viitataan valmistuksen ja kokoonpanon synkronoinnin tärkeyteen. Työvirran tasoittamisen tarkoitus on pienentää varastoja ja läpäisy aikaa. Vaihtelevuudella tuotannossa tarkoitetaan työn uudelleen tekemistä, seisokkiaikoja ja yhtenäisten työmenetelmien puutetta. (Hopp et al. 1990, ss. 79–82)

Läpäisyajan lyhentämisessä avainroolissa on työvaiheiden rinnakkaisen suorittamisen lisääminen ja mahdollistaminen vähentämällä työvaiheiden välisiä riippuvuuksia (Wadhwa et al. 2005, s. 3137). Tutkimukset osoittavat, että myös tasapainotuksen joustavuudella on huomattava merkitys tuotantojärjestelmän läpäisy aikoihin, ja että tasapainotuksen joustavuus on tuotekohtaista. Tämä voidaankin huomioida jo tuotteiden suunnitteluvaiheessa, mikä on halvempaa kuin joustavuuden lisääminen valmiiseen tuotantojärjestelmään. (Wadhwa et al. 2005, ss. 3158–3159) Tasapainotusta on käsitelty tarkemmin luvussa 2.3.4.

2.3. Layout

Layout -sanalla viitataan osastojen, työpisteiden ja -välineiden rakenteeseen ja etenkin työn virtaan systeemin läpi (Stevenson 2009, s. 249). Tässä luvussa käydään läpi perustiedot erilaisista tuotantoprosessityypeistä ja -layouteista sekä esitellään layout-suunnittelun tavoitteet ja pääkohdat.

2.3.1. Layout-mallit

Layout-päätöksillä pyritään sijoittamaan työkoneet, -toimistot ja -pöydät optimaalisesti tilanteesta riippuen. Tarkoituksena on tehostaa materiaalien, ihmisten ja tiedon virtaa alueiden sisällä ja välillä. Tavoitteiden saavuttamiseksi on luotu erilaisia perusmalleja, jotka lähestyvät suunnittelua eri lähtökohdista. (Heizer & Render 2013, s. 394)

Kiinteä layout on käytössä kun prosessoidaan suurta vaikeasti liikuteltavaa kappaletta. *Prosessiorientoitunut layout* sopii matalan volyymin ja korkean variaation tuotantoon.

Solulayout perustuu tuotteiden tai tuoteperheiden mukaan tehtävään työkoneiden ja -tekijöiden ryhmittelyyn. *Tuoteorientoituneen layoutin* tavoitteena on saavuttaa virtaava jatkuva tuotanto. (Heizer & Render 2013, ss. 395–409)

2.3.2. Layoutin merkitys

Stevenson (2009 s. 249) erittelee kolme syytä miksi layout-päätökset ovat tärkeitä:

1. Ne vaativat huomattavia rahallisia ja ajallisia investointeja.
2. Ne sisältävät pitkän tähtäimen sitoutumista, ja virheiden korjaaminen jälkikäteen on vaikeaa.
3. Niillä on huomattava vaikutus tuotannon kustannuksiin ja tehokkuuteen.

Hyvä layout auttaa yritystä saavuttamaan tuotantostrategian, joka tukee differentiaatiota, matalia kustannuksia tai joustavuutta yrityksen valinnan mukaan. Layoutsuunnittelun tavoite onkin kehittää tehokas ja toimiva layout, joka kohtaa yrityksen kilpailulliset vaatimukset. (Heizer & Render 2013, s. 394) Sen tavoite on myös luoda tilanne, jossa työn, materiaalin ja tiedon virtaus systeemissä on luontevaa ja sulavaa (Stevenson 2009, s. 249).

Layoutsuunnittelussa tulee pyrkiä ratkaisemaan, kuinka saavuttaa (Heizer & Render 2013, s. 394):

1. Tilan, työvälineiden ja henkilöstön parempi hyödyntäminen
2. Tiedon, materiaalin ja ihmisten virran kehitys
3. Työntekijöiden moraalien ja turvallisten työolojen kehitys
4. Asiakasvuorovaikutuksen kehitys
5. Joustavuus

Tehdassuunnitelman laatu ja onnistuneisuus riippuvat siitä kuinka hyvin suunnittelija kerää ja analysoi perustietoa. Tehdassuunnitelmapiirustus on vain viimeinen askel suunnitteluprosessissa, jota tulee edeltää laaja tiedonkäsittely. (Stephens & Meyers 2010, ss. 12–14) Hyvässä layoutissa on määritelty välineet materiaalin käsittelyyn, kapasiteetti ja tilavaatimukset, ympäristö ja fasiliteetit, tiedonkulun keinot sekä työalueiden välisen liikenteen kustannukset (Heizer & Render 2013, s. 395). Layoutsuunnitelmat tulee nähdä muuttuvina, sillä sidosryhmien vaatimukset muuttuvat jatkuvasti. Hyvään layoutiin on jo valmiiksi suunniteltu joustavuus, joka mahdollistaa nopeat tuote- ja tuotantomäärämuutokset. Jotta layoutista saadaan mahdollisimman joustava, tulee kouluttaa työntekijöitä toimimaan eri tehtävissä, huoltaa työvälineitä, pitää investoinnit alhaisina, sijoittaa työasemat lähelle toisiaan ja käyttää pieniä liikuteltavia työvälineitä. (Heizer & Render 2013, s. 394)

2.3.3. Suunnitteluprosessi

Stephens & Meyers (2010, ss. 12–14) esittelevät kirjassaan systemaattisen menettelytavan, jota seuraamalla tehdassuunnitelma syntyy askel kerrallaan. Menettelytapa on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. *Systemaattinen menettelytapa tehdassuunnitteluun (mukaillen Stephen & Meyers 2010, s.12–14).*

1. Määritä mitä valmistetaan.
2. Määritä kuinka monta kappaletta valmistetaan tietyssä ajassa.
3. Määritä mitkä osat valmistetaan itse ja mitkä ostetaan kokonaisina.
4. Määritä kuinka jokainen osa valmistetaan.
5. Määritä asennusjärjestys.
6. Määritä vaiheaika kullekin työvaiheelle.
7. Määritä kysyntävauhti tehtaalle.
8. Määritä tarvittavien työkoneneiden määrä.
9. Tasapainota kokoonpanolinjat ja työsolut.
10. Tutki materiaalivirtauksia aikaansaadaksesi paras virtaus.
11. Määritä toimintojen väliset suhteet.
12. Suunnittele jokaisen työpisteen asettelu.
13. Tunnista tilantarve henkilökunnan ja tehtaan palveluille.
14. Tunnista tilantarve toimistoille.
15. Laske kokonaistilantarve aikaisemman tiedon perusteella.
16. Valitse materiaalinkäsittelylaitteet.
17. Jaa alue tilantarpeen ja toimintojen välisten suhteiden perusteella.
18. Kehitä tonttisuunnitelma ja rakennuksen muoto.
19. Rakenna yleissuunnitelma.
20. Pyri kehittämään ja säädä suunnitelmaa.
21. Hae hyväksynät, pyydä neuvoja ja muuta tarvittaessa.
22. Asenna layout.
23. Aloita tuotanto.
24. Muokkaa jos tarvitsee ja päätä projekti.

Muther (1973, ss. 1-2–1-3) puolestaan esittelee layout-suunnittelun perustaksi avainmallin, jota käytetään layout-ongelmien ”avaamiseen”. Viitekehyksen osia ovat P (*Product*), Q (*Quantity*), R (*Routing*), S (*Supporting Service*), ja T (*Time*). Suomennettuna nämä osat ovat siis tuote, määrä, reititys, tukitoiminnot ja aika. Lisäksi avaimen kuviossa on sana *miksi*. (Muther 1973, ss. 1-2–1-3)

Kaiken layout-suunnittelun peruselementteinä toimivat *tuote* ja *määrä*, eli tuotetaan ja kuinka paljon. Nämä vaikuttavat layout-suunnittelun joka vaiheeseen, joten tieto ja ar-

viot tuotteesta ja sen määrästä ovat ehdottoman tärkeitä. Kun tuote ja määrä tunnetaan, tulee tutustua tuotteen *reititykseen*. Tällä tarkoitetaan prosessia, välineitä, toimenpiteitä ja niiden sarjaa. Nämä voidaan kuvata prosessikuvauksena, virtauskaaviona tai toimenpide-väline -listana. Edellä mainitut tiedot tulee aina hankkia layout -suunnittelun pohjaksi, jotta tiedetään miten *tuote* tehdään. (Muther 1973, ss. 1-1-1-3)

Tukitoiminnoilla Muther (1973) tarkoittaa muun muassa huoltoa, korjausta, työkaluvälineitä sekä toimitusten vastaanotto- ja lähetysaluetta. Nämä ovat tuotannon kannalta välttämättömiä. Niinpä tukitoiminnot tulee ottaa huomioon myös layoutsuunnittelussa, sillä ne vievät usein jopa enemmän tilaa kuin varsinainen tuotanto. *Aika* on ehkä tärkein elementti layoutsuunnittelussa. Tuotannossa *aikaan* liittyviä kysymyksiä ovat milloin, kuinka pitkään, kuinka usein ja kuinka pian. Kysymykset liittyvät niin itse tuotantoon sekä layoutprojektiin. Mutherin avainmallissa korostetaan myös kysymystä *miksi*, sillä halutaan muistuttaa, että perusdata on kyseenalaistettava varmistamalla tieto, johon koko layoutsuunnittelu pohjautuu. Kysymys tulee esittää useampaan otteeseen suunnitteluprosessin aikana. (Muther 1973, ss. 1-3)

Jotta kokoonpanolinja saadaan toimivaksi kokonaisuudeksi, tulee Sarker & Panin (1998, s. 609) mukaan hankkia tietoa ja suunnitella useita linjan osa-alueita. Suunnitteluprosessin osa-alueita on (Sarker & Pan 1998, s. 609):

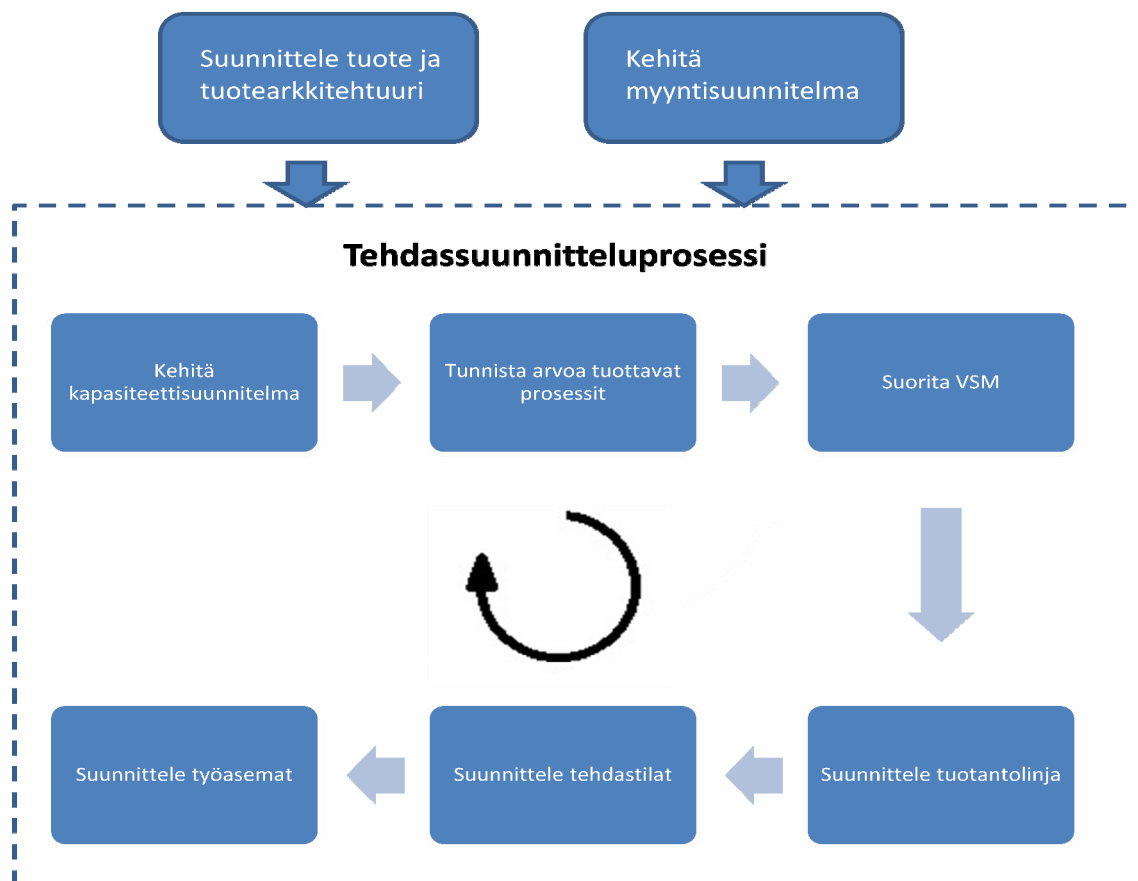
1. Työasemien lukumäärän määrittäminen.
2. Kokoonpanolinjan läpäisyajan määrittäminen.
3. Tuotevariaation sekvensointi eli tuotantojärjestyksen määrittäminen.
4. Linjan tasapainottaminen eli työtehtävien tasapainottaminen työntekijöiden välillä työntekijöiden lukumäärän minimoimiseksi.

Mullens (2011, s. 95) ja Kazi et al. (2009, s.36) esittävät teollisen rakentamisen ympäristöön soveltuvat tehtaansuunnitteluprosessit. Kazi et al. (2009, s.36) mukaan ensiarvoisen tärkeää tehtaansuunnittelussa on, että ymmärretään vaatimukset, jotka tehtaasta tulee täyttää. Jotta nämä vaatimukset voidaan täyttää, tulee (Kazi et al. 2009, s. 36):

1. Ymmärtää valmistettavan tuotteen luonne sekä rakenne.
2. Integroida suunnittelu ja valmistus, jotta ymmärretään tuotteen fyysiset rajapinnat ja voidaan asettaa liitostoleranssit.
3. Määrittää tuotannon prosessivirta sekä avainprosessit.
4. Määrittää materiaalien logistinen virta ja sen avainkohdat.
5. Kehittää virtauskaavioita iteratiivisesti.
6. Luoda prosessisimulaatio kuvaamaan tuotantoa pääpiirteisesti.
7. Luoda prosessisimulaatiomallit avainprosesseista ja -virroista.
8. Ymmärtää mahdolliset pullonkaulat ja eri prosessiteknologioiden erot.
9. Pohtia kuinka tehdasratkaisusta tulisi kestävä.

10. Luoda yksityiskohtainen prosessivirtakuvaus tuotannon ja logistiikan ratkaisuille.

Mullens (2011, s. 95) esittää moduulitehtaan suunnitteluprosessin, johon sisältyvät vaiheet on esitetty kuvassa 2. Suunnitteluprosessi on jaettu kaupallistamis- ja tehdassuunnitteluprosesseihin.



Kuva 2. Moduulitehtaan suunnitteluprosessi (mukaillen Mullens 2011, s. 95).

Varsinaiseen tehdassuunnitteluprosessiin kuuluu kuusi vaihetta, jotka ovat melko laajoja kokonaisuuksia. Vaikka kuvassa vaiheet on esitetty sarjana, toimii menetelmä parhaiten, kun prosessin vaiheet suoritetaan osittain samanaikaisesti. Lisäksi prosessi on iteratiivinen, pyrkien jatkuvaan kehitykseen. (Mullens 2011, s. 95)

Prosessin ensimmäinen askel on kapasiteettisuunnitelman laatiminen. Sen tarkoitus on määrittää kuinka kapasiteetti toteutetaan vastaamaan myyntisuunnitelmaa, eli kuinka monta tuntia tulee työskennellä jotta päästään tiettyyn tuotantomäärään. Käytännössä tulee siis määrittää käytettävissä oleva aika ja tavoiteltu tuotantomäärä ja tämän avulla laskea kysyntävauhti, jolla pystytään tuottamaan tarvittava määrä tuotteita vuodessa. (Mullens 2011, s. 97)

Tuotantoprosessit lisäävät arvoa käytettäviin materiaaleihin muuttaen ne valmiiksi tuotteiksi. Tärkeää onkin tunnistaa koko tuotantoprosessin turvalliset, luotettavat ja kustan-

nustehokkaat prosessiteknologiat, joiden avulla voidaan saavuttaa tuotantotavoite. Prosessien määrittämiseen sisältyy työvoimantarpeen ja tahtiajan määrittäminen, vaihe aikojen määrittäminen sekä vaihe aikojen vaihtelun arvioiminen. (Mullens 2011, ss. 98–102)

Arvovirran kartoituksen (Value Stream Mapping, VSM) tarkoitus on havainnollistaa arvoa tuottavien toimintojen välistä järjestystä ja riippuvuutta tuotannossa sekä luoda pohja tuotantoprosessin kehittämistä varten. Kartoituksen pohjalta on helppo nähdä mahdollinen hukka kuten variaatiot, pullonkaulat, viivästymiset sekä varastot. Kriittinen polku -työkalu on yksi versio vaihekaaviosta, jossa on ilmaistu työvaiheiden riippuvuudet. Sen avulla saadaan teoreettinen minimiläpäisy aika tuotantoprosessille. Pisin polku taas ilmaisee todellisen suunnitelman mukaisen läpäisyajan tuotteelle huomioiden myös hukkaa aiheuttavat toiminnot. Kriittisen polun ja pisimmän polun tuloksia on tärkeää vertailla ja käyttää pohjana tuotantoprosessin kehittämiseksi. (Mullens 2011, ss. 103–112) Henrich & Koskela (2005, s. 7) kuitenkin toteavat, ettei kriittisen polun menetelmä ole täydellinen, koska se ei tunnista resurssien liikkumista fyysisten sijaintien välillä ja koska sen taustalla on työntöohjaustyypinen ajattelumalli.

Tuotantolinjan suunnittelu sisältää työtehtävien jaon työasemille, työasemien järjestelmisen layoutiksi ja materiaalinjakelun linkittämisen työasemiin (Mullens 2011, s. 144). Suunnittelu alkaa työasemien määrän määrittämisellä, jonka jälkeen työtehtävät jaetaan näille asemille. Layoutin suunnittelussa tulee tehdä päätös valmistettavan moduulin mahdollisesta liikuttamisesta sekä työasemien muodosta. Materiaalinjakelun kohdalla tulee suunnitella eri materiaalien ja myös itse moduulin liikuttaminen ja varastointi. (Mullens 2011, ss. 145–193)

Tehdastilojen suunnittelussa päätetään muun muassa pienempien osakokoonpanojen, varastojen, sosiaalityötilojen sekä rakenteiden sijainnit. Suunnitteluprosessin viimeisenä vaiheena suunnitellaan yksittäiset työasemat. Työasemien materiaalien sijainnit ja työn tekijä- sekä materiaalivirrat suunnitellaan niin, että hukkaa syntyy mahdollisimman vähän. (Mullens 2011, ss. 193–201)

2.3.4. Suunnitteluprosessin vaiheet

Edellä on esitelty erilaisia tuotantojärjestelmä ja layout -suunnitteluprosesseja yleisesti. Tässä luvussa käydään yksityiskohtaisemmin läpi suunnitteluprosessin eri vaiheita. Lisäksi on tuotu esiin erityispiirteitä, jotka tulee huomioida varioituvaa tuotantoa suunniteltaessa. Bukchin et al. (2002, s. 406) mukaan nykyisessä markkinaympäristössä, jossa tuotteiden elinkaaret ovat lyhyitä ja tuotevariaatiot korkeita, on valmistettava suuri määrä erilaisia versioita tuotteista melko pienissä erissä ja toisaalta saatettava tuote asiakkaalle lyhyellä läpäisyajalla. Tästä huolimatta tuotannon tulisi olla sekä tuottavuudeltaan, laadultaan että kustannustehokkuudeltaan erinomaista. Lisäksi joustavuus on avainroolissa, jotta pystytään saavuttamaan tuotteilta vaaditut ominaisuudet. (Bukchin et al. 2002, s. 406)

Kysyntävauhdin määrittäminen

Jotta tuotantotavoitteet saavutettaisiin, tulee jokaisen koneen ja operaation pysyä tietyssä tahdissa. Aikaa, jota työvaiheiden, prosessien, osien ja komponenttien tulee seurata, kutsutaan kysyntävauhdiksi. Kysyntävauhdin laskemiseksi on tiedettävä tuotantotavoite ja aika, joka kyseisten tuotteiden valmistamiseen on käytettävissä sekä kaikki ei-tuottava aika, joka on pois valmistuksesta. Ei-tuottavaksi ajaksi lasketaan esimerkiksi tauot, tiimipalaverit ja lounastauot. (Stephens & Meyers 2010, s. 28)

Ylempänä kysyntävauhtia määritettäessä ei otettu huomioon virheellisten tai hyödyttömien tuotteiden syntymistä. Tämä aiheuttaa usein tarpeen tehdä sama työ uusiksi. Tällainen toiminta on epätehokasta ja hukkaa, josta tulisi päästä eroon. Kuitenkin jos suttu syntyy, tulee se huomioda laskettaessa työvaiheiden tahdistusta. Aika on yksi tärkeimmistä luvuista tehtaansuunnittelussa. Sen avulla lasketaan työkonien ja työpisteiden määrä, linjan nopeus ja työntekijöiden tarve. (Stephens & Meyers 2010, ss. 29–30)

Tuotantoprosessin määrittäminen

Jotta tuote voidaan valmistaa kokoonpanolinjalla, tulee kokonaistyö jakaa perusosiin. Näitä osia kutsutaan työvaiheiksi. Työvaiheen suorittamiseen kuuluu tietty vaihe-aika, se vaatii tietyt työvälineet ja/tai tietyjä taitoja työntekijältä. Teknisistä ja organisatorisista syistä johtuen työvaiheiden suoritusjärjestys tulee havainnollistaa. (Becker & Scholl 2006, s. 695)

Työvaiheiden suoritusjärjestys määräytyy niiden välisten riippuvuuksien perusteella: jotkut tehtävät on suoritettava ennen toisia. Suoritusjärjestys voidaan havainnollistaa esimerkiksi näitä riippuvuuksia kuvaavalla vaihekaaviolla, jossa on esitetty työvaiheet, niiden kestot ja näiden väliset riippuvuudet. (Krajewski et al. 2010, s. 295)

Vaihe-ajokäytetään viiteen päätarkoitukseen tehdassuunnittelussa. Näitä ovat työasemien ja -koneiden määrittäminen, työntekijöiden lukumäärän määrittäminen, tuotantolinjan nopeuden määrittäminen, kokoonpanolinjojen tasapainottaminen ja työsolujen kuormitus. (Stephens & Meyers 2010, ss. 92–93)

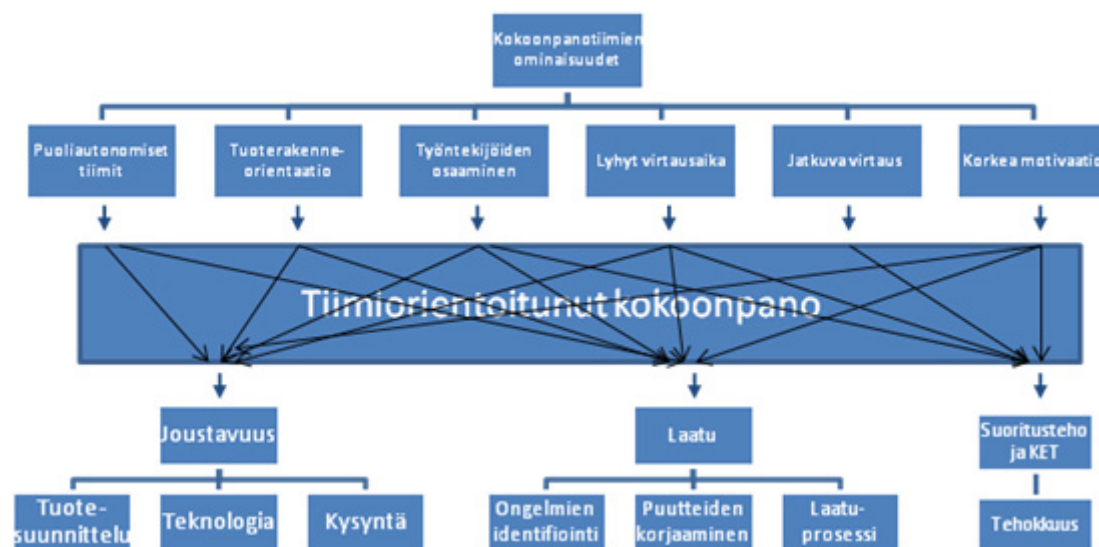
Tehtävänjako työasemille

Kokoonpanolinjan työasemat voivat olla joko avoimia tai suljettuja riippuen siitä, työskenteleekö työntekijä useilla asemilla vai tuleeko hänen pysytellä vain omalla asemallaan (Sarker & Pan 1998, s. 609). Linjalla voi myös olla asemia, joilla työtehtäviä voidaan suorittaa vain tietyltä puolelta tai molemmilta puolilta linjaa tai tehtäviä, jotka vaativat molemmilta puolilta linjaa työskentelyä samanaikaisesti (Bartholdi 1993, s. 2447).

Perinteisellä tuotantolinjalla ei töitä suoriteta rinnakkain, jolloin tuotannon läpäisy-aika on vähintään vaihe-ajojen summa. Vaihtoehtoisesti voidaan työasemia ja työtehtäviä

suorittaa rinnakkain ja samanaikaisesti, sijoittamalla useampia työntekijöitä samalle työasemalle. Näin voidaan lisätä tuotantonopeutta ja siten lyhentää läpäisyaikaa. Rinnakkaisten työvaiheiden suunnittelu tapahtuu kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa työtehtävät jaetaan työpisteille ja toisessa vaiheessa työvaiheet jaetaan työntekijöille työasemien sisällä. (Akagi et al. 1983, s. 755)

Tiimiorientoitunut kokoonpanojärjestelmä on vaihtoehto perinteiselle kokoonpanojärjestelmälle. Se on useista puoliautonomisista tiimeistä koostuva verkosto, jossa tiimit ovat vastuussa suorittamistaan työvaiheista. Tiimiorientoituneen kokoonpanolinjan edut perinteiseen verrattuna liittyvät järjestelmän joustavuuteen ja tuotteiden laatuun, kun työntekijöille on tarjolla miellyttävä työympäristö. Kuvassa 3 on esitetty tiimiorientoituneen kokoonpanolinjan ominaisuuksia ja vaikutuksia. Tiimiorientoituneen järjestelmän hyödyt kasvavat, kun työvaiheprosesseissa esiintyy joustavuutta ja useampia työvaiheita voidaan suorittaa samanaikaisesti. Tällainen tilanne on suurten ja laajoja tuoterakenteita sisältävien tuotteiden valmistuksessa. (Bukchin & Masin 2004, ss. 347–348)



Kuva 3. Tiimiorientoituneen kokoonpanon ominaisuudet ja vaikutukset tuotantoon (Mukailleen Bukchin & Masin 2004, s. 329).

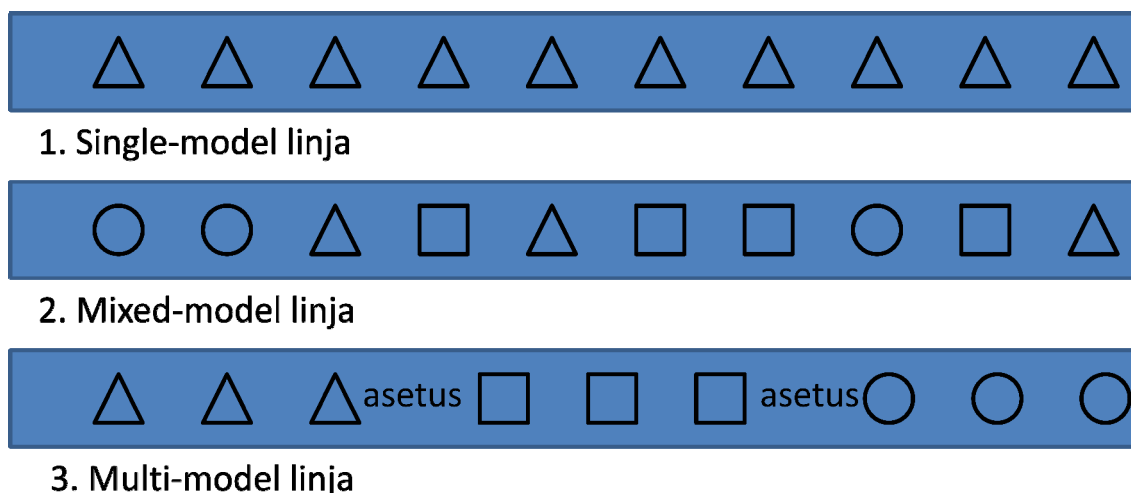
Mikäli kokoonpanolinjalla esiintyy tuotevariaatiota, työajat työasemilla saattavat vaihdella. Tämä taas saattaa vaiheajan ollessa vakio aiheuttaa sen, että tietyt työntekijät joutuvat odottamaan uutta työstettävää tuotetta, ja toisaalta jotkut työntekijät eivät ehdi tehdä työvaihetta loppuun. Tällöin linja ei ole tasapainossa eikä työvoimaa hyödynnetä maksimaalisesti. Tilanteen korjaaminen johtaa hyvin todennäköisesti työvoiman parempaan hyödyntämiseen, tuotteiden parempaan laatuun ja lopulta tuotantokustannusten pienenemiseen. (Sarker & Pan 1998, s. 610)

Heike et al. (2001, s. 119) toteavat artikkelissaan, että varioituvan tuotannon kustannuksien minimoimiseksi tulee yhtäaikaaisesti optimoida työntekijöiden määrä, tuotannon tahtiajat, moniosaamisen taso, työn sekvensointi sekä työtehtävien jako työasemille.

Tämän ongelman ratkaisu on kuitenkin hyvin vaikeaa. Optimaaliseen ratkaisuun voidaan kuitenkin päästä analysoimalla ja ratkaisemalla edellä mainitut osa-alueet erikseen. (Heike et al. 2001, s. 119)

Varioituvien tuotteiden valmistusjärjestys

Tuotanto- ja kokoonpanolinjat voidaan jakaa kolmeen ryhmään sen mukaan millainen on tuotevariaatio ja missä järjestyksessä tuotteita valmistetaan. Mikäli tuotteita on vain yhdenlaisia, on kyseessä yhden mallin (single-model) linja. Jos taas tuotteita on erilaisia, voidaan niitä valmistaa sekamalli- (mixed-model) tai monimallilinjassa (multi-model). Sekamallilinjassa tuotteita valmistetaan vaihtelevassa järjestyksessä riippuen esimerkiksi kysynnästä. Monimallilinjassa taas tiettyä tuotevariaatiota valmistetaan tietyn aikaa, jonka jälkeen on mahdollista pitää valmistustauko asetuksien muuttamista varten ja tämän jälkeen jatkaa toisen tuotevariaation valmistusta. (Becker & Scholl 2006, s. 696) Kuvassa 4 on esitetty erilaiset tuotteiden valmistusjärjestysvaihtoehdot.



Kuva 4. Tuotteiden valmistusjärjestysvaihtoehdot (mukaillen Becker & Scholl 2006, s. 696).

Varioituvan tuotannon tasapainotus ja aikataulutus

Tuotannon jatkuvan virtaamisen yleisin este lienee prosessiaikojen variaatio. Variaation lähteitä ovat tuotevariaatio ja vaihe aikojen variaatio työasemien välillä (Bukchin 1998, s. 2669). Mullens (2011, s.35) esittää, että vaihtelu voi johtua myös satunnaisesti ilmenevistä, hukkaa aiheuttavista tehottomuuksista tai viivästyksistä kuten uusimistyöstä, materiaalien puutteista, suunnitteluvirheistä, tilausmuutoksista tai työvälinerikoista. Mikäli tämän variaation takia tietyllä työasemalla ylitetään tahtiaika, myöhästyy myös seuraavilla asemilla työvaiheiden aloitus. Lisäksi, jos asemaa ennen ei ole jonotustilaa, viivästyy myös edellisten työasemien toiminta. (Mullens 2011, s. 35)

Tuotevariaation kasvua pyrittiin jo kehityksen varhaisessa vaiheessa hallitsemaan sekamallilinjien tasapainotuksella ja sekvensoinnilla. Tasapainotusongelman ratkaisemisen

tarkoituksena oli jakaa tuotemixin päivittäinen tai työvuorokohtainen työkuorma tasaisesti. Tässä menetelmässä kokonaistyökuorma on tasapainotettu koko vuoron ajalle, eikä yksittäisen aseman vaiheajoille, olettaen että tuotemix on pysyvä ja määritelty. (Bukchin et al. 2002, s. 406)

Kokoonpanolinjan tasapainottamisen tavoite on pyrkiä jakamaan työntekijöiden tekemä työmäärä mahdollisimman tasaisesti työntekijöiden kesken. Tähän voidaan pyrkiä jakamalla työtehtäviä pienempiin osiin tai jakamalla niitä uusiksi kokonaisuuksiksi, joiden ajat ovat yhtäläisiä. Työntekijä tai työasema, jolla on eniten työtunteja, toimii usein tasapainotuksen lähtökohtana. (Stephens & Meyers 2010, s. 111)

Becker & Scholl (2006) toteavat, että kokoonpanolinjan tasapainottamiseen liittyvä tutkimus tarkastelee perinteisesti yksinkertaistettuja tasapainotusongelmia. Kuitenkin viime aikoina on tutkimus siirtynyt laatimaan ja ratkaisemaan yleisempiä ongelmia, joissa voidaan ottaa huomioon erilaisia ominaisuuksia. Näitä ovat esimerkiksi kustannusnäkökulmat, välineiden valinta, rinnakkaisuus, U-muotoiset linjalayoutit sekä sekatuotantolinjat. Kuitenkin näiden mallien kehitys on vasta alussa ja paljon kehitystä tarvitaan vielä. (Becker & Scholl, 2006) Seuraavassa on esitelty tutkijoiden esittämiä keinoja varioituvia tuotteita sisältävien kokoonpanolinjojen tasapainottamiseksi. Tasapainotuksessa voidaan pyrkiä tasapainottamaan työkuormaa työasemien välillä tasapainotushukan minimoimiseksi tai tasapainottamaan tuotevariaatiosta johtuvaa vaihtelua.

Bukchin et al. (2002, ss. 409–419) esittelee artikkelissaan tasapainotusmenetelmän, joka huomioi nykyaikaisen kokoonpanolinjan tarpeet ja tavoitteet. Heidän mukaansa tällöin lähtökohtana tulee olla valmistus tilausten mukaan. Nykyaikaiset kokoonpanolinjat perustuvat kirjoittajien mukaan usein lyhyisiin linjoihin, jotka ovat yksinkertaisempia kuin perinteiset kokoonpanolinjat. Lisäksi työntekijät ovat ammattitaitoisia ja pystyvät suoriutumaan monenlaisista tehtävistä. Bukchinin mallin mukaan tiettyä työvaihetta ei ole jokaisen tuotemallin kohdalla pakko suorittaa tietyllä työasemalla, vaan mikäli työvaiheen tekemiseen vaadittavat työkalut eivät ole kalliita, voidaan työvaihetta suorittaa useammalla eri työasemalla. Menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta. Ensimmäisessä tehdään yhdistetty työvaiheiden vaihekaavio, jossa on määritelty työvaiheiden suoritustjärjestys kaikille tuotevariaatioille. Tämän jälkeen jokaiselle tuotevariaatiolle tehdään oma tasapainotus. Kolmannessa vaiheessa ratkaisua kehitetään sijoittamalla työvaiheita uudelleen kunnes työvaiheiden paikkoja ei voida enää siirtää rikkomatta ensimmäisessä vaiheessa tehtyä vaihekaaviota. (Bukchin et al. 2002, ss. 409–419)

Heike et al. (2001, s. 108) esittää, että työntekijöiden monitaitoisuuden kautta voidaan jakaa työntekijöitä työasemien välillä. Tätä keinoa hyödynnetään esimerkiksi auto- ja hälytysajoneuvoteollisuudessa. Tarkoituksena on, että työntekijöitä siirretään pullonkaula-asemille, kun heillä on vapaata aikaa odottaessaan seuraavaa työstettävää tuotetta. Menetelmän tehokkuus riippuu siitä, kuinka tehokkaita työntekijät ovat eri työasemilla, kuinka moni työntekijä on koulutettu toimimaan muilla työasemilla ja kuinka monella

eri työasemalla työntekijä voi työskennellä yhden päivän aikana. päätyvät artikkelissaan siihen lopputulokseen, että käyttämällä joustavaa työvoimaa, eli jakamalla työntekijöitä työasemien välillä, voidaan saavuttaa huomattavia etuja pienen volyymin tuotannossa. (Heike et al. 2001, s. 108) Myös Sarker & Pan (1998, s. 624) päätyivät tutkimuksessaan lopputulokseen, että avoimia työasemia sisältävät tuotantojärjestelmät ovat kokonaiskustannuksiltaan alhaisempia, kun järjestelmässä on optimoitu asemalle syöttövälit, työasemien pituudet, työntekijän aloituspisteet ja työaseman sijoitus prosessissa.

Zavadlav et al. (1996, ss. 1151–1160) esittävät tasapainotusmallin, joka sopii tuotantoon, jossa työntekijät ovat rajoittava resurssi ja ennustaminen on vaikeaa. Mallissa tuotannon työntekijöiden työkuorma tasapainottuu jatkuvasti ja automaattisesti muutosten tapahtuessa. Seurauksena on, että kaikilla työntekijöillä on tehtävää saman ajanjakson ajan. Käytännössä tasapainotus tapahtuu niin, että kun työntekijät ovat valmiita tietyn työvaiheen kanssa, he siirtyvät edelliselle, viereiselle tai satunnaiselle työpisteelle suorittamaan uutta tehtävää. Työntekijät voivat liikkua tiettyjen vakiosääntöjen mukaan tai satunnaisesti työpisteille, joissa on tilaa. (Zavadlav et al. 1996, ss. 1151–1160)

Työntekijöiden itseohjautuva tasapainotus -menetelmän käytön edellytyksenä on, että työntekijät on monitaitoisia toimimaan eri tehtävissä. Lisäksi menetelmän onnistumiseen vaaditaan tiimityöskentelytaitoa. Kuitenkin onnistuessaan menetelmä vähentää keskeneräisen tuotannon määrää ja parantaa tuottavuutta. (Zavadlav et al. 1996, s. 1163) Bartholdi & Eisenstein (1996, s. 29) tuovat artikkelissaan esiin, että välittömästi tuotantolinjan käyttöönoton jälkeen työtehtävien jako ja keskinäinen tasapaino on epätäydellistä. Käyttämällä työntekijäohjautuvaa menetelmää työtehtävien tasapainottamiseksi voidaan toimintoja muokata sujuvammaksi ilman johdon puuttumista asiaan. Lisäksi menetelmä vähentää riippuvuutta tietyistä työntekijöistä. (Bartholdi & Eisenstein 1996, s. 29)

Heike et al. (2001, s. 105) tutkivat artikkelissaan erilaisia tasapainotuskeinoja pienen volyymin tuotantoon. Myös he korostavat työntekijöiden monitaitoisuutta. Lisäksi heidän mukaansa tuotantoon sopivia tasapainotuskeinoja ovat myös esimerkiksi työn sekvensointi, linjatasapainotus, eräkokojen optimointi ja puskurivarastojen hyödyntäminen. (Heike et al. 2001, s. 105) Myös Liker (2004, s. 105) esittää kirjassaan, että vaikka ihanteellisessa tuotannossa ei käytetä varmuus- tai välivarastoja, käytännössä sujuvan tuotantovirran aikaansaamiseksi joudutaan kuitenkin sijoittamaan usein varmuusvarastoja tuotantoon.

Baker et al. (1993, s. 105) mukaan tuotannon suoritusteho kasvaa, kun tasapainotetulta kokoonpanolinjalta siirretään työtä kohti osakokoonpanoja ja syöttöasemia. Tasapainotetussa järjestelmässä kokoonpanoasemat ovat siis pullonkauloja. (Baker et al. 1993, s. 105) Myös Baudin (2002, s. 121) toteaa saman, mutta muistuttaa, että kaikkia kokoonpanovaiheita ei kuitenkaan erotella osakokoonpanoihin. Jotta osakokoonpanoja voidaan

siirtää pois päälinjalta, tulee niiden olla matalasti kuormitettuja, koostua pienistä helposti varastoitavista osista ja olla helposti liikuteltavissa (Stephens & Meyers 2010, s. 112).

Kun kokoonpanolinjalla kappaleiden liikuttaminen tapahtuu koneistetulla liukuhihnalla, kappale pysyy jokaisella työasemalla samanpituisen ajan. Tällöin tasapainotuksen tarkoitus on hyödyntää tämä aika mahdollisimman hyvin. Kuitenkin jos kappaleita liikutellaan työntekijöiden toimesta tai työasemien välinen liikenne on manuaalisesti kontrolloitua, tulee kappaleen työasemilla viettämiin aikoihin eroavaisuuksia. Mikäli kaikki asemat on tasapainotettu täydellisesti, viivästys yhdellä työasemalla viivästyttää koko tuotantoa. Tämän takia tulisikin säilyttää pieni epätasapaino linjalla esimerkiksi niin, että alun työasemilla on löysempi aikataulu kuin tuotantoprosessin loppupäässä. (Baudin 2002, ss. 122–123) Myös Baker et al. (1993, s. 105) suosittelevat jonkinasteisen epätasapainon sallimista suunnitteluvaiheessa.

Tehokas materiaalinjakelu

Materiaalin sijainti väärässä paikassa, kaukana työasemasta tai valmistelemattomana johtaa kokoonpanijan työhön kuluvan ajan pitenemiseen. Kokoonpanolinjalla vaikutukset moninkertaistuvat, sillä jokainen yksittäisen työntekijän materiaalinhakuun tai valmisteluun kuluva sekunti lisää tasapainotetulla linjalla myös muiden työasemien taktiaikaa. Tämän takia tehokas materiaalinjakelu on tärkeää ja materiaalinjakelu asemille kannattaa järjestää muilla tavoin kuin laittamalla työntekijät hakemaan omat materiaalinensa. Materiaalinkäsittelijät toimivat rinnakkain, joten he eivät ole riippuvaisia toistensa suorituksista. (Baudin 2002, ss. 172–173)

Materiaalinjakelun suunnittelussa ja kehittämisessä voidaan pitää ohjeena seuraavia periaatteita: pakkauksien poistaminen ennen jakelua, sijainti kokoonpanijan käden ulottuvilla, kappaleen toimittaminen asennussuunnassa, erikoisten osien ominaisuuksiin sopeutuminen, materiaalien määrä vakiojaksolle ja materiaalien määrän laskemisen helpottaminen (Baudin 2002, ss. 176–184). Materiaalinjakelussa voidaan käyttää apuna materiaalivestavaa, jonka tehtävänä on valmistella materiaalit ja setit sekä toimittaa ne muille kokoonpanijoille ja tarvittaessa toimia tuuraajana lyhyitä aikoja myös työasemilla. Tämän työntekijän tulee olla hyvin monipuolinen ja -taitoinen. (Baudin 2002, ss. 189–190)

Materiaalinjakelussa voidaan käyttää setitystä tai syöttää materiaalit suoraan linjan viereen. Tehokkainta olisi hyödyntää molempia materiaalinjakelutapoja samalla linjalla. Setteihin on tarkoitus laittaa tarvittavat materiaalit tiettyä kokoonpanoa varten ja syöttää nämä setit yksittäin työasemalle. Jotta setityksestä voidaan hyötyä, tulee setitys suorittaa yhdelle tuotteelle, juuri ennen kokoonpanoa ja materiaalit poistettuna pakkauksista jäsenneltyyn kuormalavaan, jossa on merkitty paikka jokaiselle osalle. (Baudin 2002, s. 185)

Varastonhallinnan yksi haaste on tasapainotella suuren ja pienen varaston hyötyjen ja haittojen välillä. Paine pienen varaston pitämiseen tulee siitä, että varastot sitovat pääomaa, aiheuttavat varastointi- ja käsittelykustannuksia, sekä saattavat johtaa verojen, vakuutuksien sekä arvionlaskun nousuun. Toisaalta suuren varaston ylläpitämiseen syiksi voidaan nähdä asiakaspalvelun paraneminen (tuotteita voidaan aina myydä heti), tilauskulujen vähentyminen, asennuskulujen pieneneminen eräkokojen suurentuessa, työvoiman ja -välineiden parempi hyväksikäyttö, kuljetuskustannusten pieneneminen ja paljousalennusten hyödyntäminen. (Krajewski et al. 2010, ss. 347–349)

Materiaalien varmuusvarastoja voidaan hyödyntää puuttuvista materiaaleista johtuvien asiakaspalveluongelmien tai piilevien kustannusten estämisessä. Niiden avulla voidaan suojaautua kysynnän, läpäisyajan tai toimitusten yllättäviltä vaihteluilta. Varmuusvarastoja voidaan kerryttää tilaamalla tai valmistamalla materiaaleja, komponentteja tai osakokoonpanoja etukäteen. Kuitenkin suositeltavaa on, että tuotannon epävarmuuksia pyritäisiin ehkäisemään muilla keinoin. Näitä ovat muun muassa läheisempien toimittajasuhteiden luominen ja työvälineiden sekä -tekijöiden käyttäminen puskureina materiaalien sijaan. (Krajewski et al. 2010, ss. 349–351)

2.4. Tutkimuksen perustana käytettävät suunnittelumenetelmät

Luvussa 2 esitetty teoria on teollisen tuotannon perusteoriaa, josta suurin osa on kehitetty ja ollut käytössä jo useita vuosikymmeniä. Tämä näkyy siitä, että lähteinä käytettyihin julkaisujawoiltaan vanhoihin artikkeleihin ja niiden päätelmiin viitataan myös uusissa artikkeleissa, jotka lähinnä soveltavat oppeja uusiin ympäristöihin. Tästä voidaankin päätellä, että perustoimintatavat tehdassuunnittelussa ja työntutkimuksessa ovat vakioituneet. Kuitenkin esimerkiksi tasapainotuksen suhteen tutkimusta tehdään vielä paljon ja mielipide-eroja on helppo havaita. Yritysten kasvavat paineet valmistaa varioituvia tuotteita ja parantaa tuottavuutta luovat haasteita tuotannon tasapainottamiseen.

Stephen & Meyersin (2010) esittelemät tehdassuunnittelutyypit on listattu luvussa 2.1. Tehdassuunnittelutyypiltään tässä työssä tehtävän suunnitteluprosessin voidaan sanoa olevan sekoitus uutta laitosta ja kustannusten alentamista. Tuotanto jatkuu uusissa tiloissa, mutta kuitenkin olemassa on jo tietylle tuotteelle kehitetty tuotantojärjestelmä, jota halutaan kehittää.

Luvussa 2.3.3. on esitetty Stephen & Meyersin (2010) tehdassuunnitteluprosessi, Mutherin (1973) luoma layoutsuunnittelumalli, Sarker & Panin (1998) tuotantolinjan suunnitteluprosessi sekä Kazi et al. (2009) ja Mullensin (2011) kehittämät talotehtaan suunnitteluprosessit. Suunnitteluprosessimallit ovat vaiheiltaan samankaltaisia ja kaikissa tuotantolinjan suunnittelu perustuu tuotteen tuotantoprosessin ja sen vaiheiden määrittämiseen sekä kapasiteettitarpeeseen.

Huomioitavaa on, että suunnittelumallin nimeämisen perusteella ei voida päätellä, kuinka laajaan osaan koko suunnitteluprosessia se ottaa kantaa. Esimerkiksi Mutherin (1973) esittämässä layoutsuunnitteluprosessissa huomioidaan sekä tuote että kapasiteetti, koska ne ovat layoutsuunnittelun kannalta oleellisia päätösalueita. Muissa malleissa tämä osa ei kuitenkaan varsinaisesti kuulu tehtaan tilojen suunnitteluun, vaan on eritelty tehtäväksi jo ennen layoutsuunnittelua. Toisaalta Sarker & Panin (1998) esittelemän tuotantolinjan suunnitteluprosessin toteuttamiseksi tulee ensin hankkia tietoa tuotteesta ja sen valmistusprosessista, sillä se ei itsessään sisällä näitä vaiheita. Tästä voidaankin tehdä johtopäätös, että suunnitteluprosessin rajaaminen koskemaan vain tiettyä osaa koko prosessista on hankalaa, sillä toimivan kokonaisuuden luomiseksi tarvitaan aina tietoa edeltävistä vaiheista.

Stephen & Meyersin (2010) suunnittelumalli on esitellyistä suunnittelumenetelmistä laaja-alaisin, sillä se ottaa kantaa myös suunnitelman implementointiin. Tässä diplomityössä kuitenkin keskitytään tehdassuunnittelun alkuvaiheeseen, jättäen pois varsinaisen suunnitelman implementointi. Stephen & Meyersin (2010) systemaattisen tehdassuunnittelun mallin mukaisesti tämä diplomityö keskittyy kymmeneen ensimmäiseen vaiheeseen.

Sarker & Panin (1998) tuotantolinjasuunnittelu on melko yleisluontoinen ohjeistus siitä, mitä osa-alueita tulee pohtia tuotantolinjaa suunnitellessa. Kuitenkin kaikki nämä osa-alueet (luku 2.3.3.) on myös huomioitu tässä työssä. Mutherin (1973) malli korostaa tietojen ja jo tehtyjen päätösten kriittistä arviointia toistamalla miksi -kysymystä koko suunnitteluprosessin ajan. Tämä johtaa siihen, että suunnitteluprosessissa voidaan aina palata edellisiin vaiheisiin pyrkien iteratiiviseen suunnitteluprosessiin. Näin toimitaan myös tässä suunnitteluprosessissa.

Kazi et al. (2009) ja Mullensin (2011) esittämät teollisen rakentamisen ympäristöön soveltuvat tehdassuunnitteluprosessit eivät lähtökohtaisesti eroa lainkaan perinteisen tuotantoteorian malleista. Kazi et al. mallissa jopa korostetaan perinteiselle tuotannolle ominaisia piirteitä, kuten tuotteen tehtävän ymmärtämistä ja arvovirran kehittämisen tarvetta. Voidaankin päätellä, että suunnitteluprosessi itsessään voi olla hyvin samankaltainen tuotteesta riippumatta. Kuitenkin suunniteltaessa tiettyjä osa-alueita tai vertaillaessa eri ratkaisutapoja tulee huomioida toimintaympäristö ja sen asettamat vaatimukset. Teollisen rakentamisen toimialaa käsitellään luvussa 3, jossa johdetaan myös rakennusmoduulitehtaan suunnittelussa huomioitavat, perinteisestä tuotannosta poikkeavat, ominaisuudet.

Luvussa 2.3.2 esitellään hyvän layoutin ominaispiirteitä. Näistä voidaan nostaa esiin muuttuvien asiakastarpeiden takia layoutin joustavuus ja kustannustehokkuuden saavuttamiseksi työntekijöiden sekä materiaalin virtaamisen kehittäminen. Myös suunnitteluprosessimalleissa korostetaan arvovirran tuntemista, ja lähtökohtana tähän toimii tuotantoprosessin todellinen tunteminen. Kaikissa suunnitteluprosessimenetelmissä on osana

tuotantoprosessin määrittäminen. Voidaankin todeta, että tuotantoprosessin tutkiminen esimerkiksi työntutkimuksen muodossa on tärkeä osa tuotantojärjestelmän suunnittelu-prosessia. Työntutkimus toimiikin tämän työn suunnittelun lähtökohtana.

Tuotannon tasapainotuksen keinoista on kirjallisuudessa käyty keskustelua jo pitkään, eikä yhdestä tietystä kaikissa tapauksissa toimivaksi todetusta menetelmästä ole vielä päädytty yksimielisyyteen. Tasapainotusmallien monimutkaisuus vaihtelee huomattavasti samoin kuin niiden soveltuminen varioituvaan tuotantoon. Yleisesti voidaan todeta, että tuotevariaation kasvaessa myös tasapainotusmenetelmän monimutkaisuus kasvaa. Tasapainotusmenetelmistä osa ottaa kantaa vain tuotevariaatiosta johtuvien tai asemien välisten vaihteluiden tasapainottamiseen, mutta osa kattaa molemmat. Tässä diplomityössä tasapainotuksessa on huomioitu molemmat vaihteluiden lähteet. Tuotevariaatio ei vielä tarkasteltavan yrityksen tässä elinkaaren vaiheessa ole suurta, mutta sen oletetaan kasvavan, mikä tulee huomioida myös tuotantojärjestelmän laadinnassa.

Tasapainotuskeinoiksi esitetään työntekijöiden omatoimisesti tapahtuva liikkuminen, työasemien ja -tekijöiden tahtiaikojen tasaaminen toisiinsa nähden, tuotannon painotuksen siirto esivalmistukseen ja varmuusvarastojen käyttö. Yleisesti todetaan, että tasapainottaminen on hankalaa saada halutulle tasolle ennen kuin ratkaisut on implementoitu ja tämän jälkeen edelleen kehitetty todellisessa ympäristössä. Tuotantolinjan tasapainon tasosta voidaan kuitenkin havaita eriäviä mielipiteitä. Toisaalta voidaan todeta, että täydellisesti tasapainotettu linja on toimiessaan tuottavin. Toisaalta taas epätasapainoa sisältävät tuotantolinjat eivät ole yhtä herkkiä häiriöille ja niillä on siten enemmän joustavuutta. Tämän perusteella johtopäätöksenä todetaan, että pientä epätasapainoa sisältävä tuotantolinja on sekä tuottava, mutta myös joustava.

Tässä työssä käytettävä suunnitteluprosessi on koostettu luvussa 2 esitellyistä menetelmistä. Sen vaiheita ovat:

1. Tuotteen määrittäminen
2. Tuotannon kapasiteettisuunnittelu
3. Tuotantoprosessin määrittely
4. Tuotantojärjestelmän suunnittelu
5. Joustavuuden suunnittelu
6. (Tuotantojärjestelmän toteutumisen edellytykset)

Työssä suunnitteluprosessista käytetään ilmaisua tuotantokonseptin suunnittelu. Työn pääpaino on tuotantolinjan suunnitteluvaiheella sekä sitä edeltävällä tuotantoprosessin määrittelyllä. Lähtötilanne ja kapasiteettisuunnittelu on myös käyty läpi, sillä ne ovat oleellista suunnitteluprosessin lähtötietoa. Tuotantojärjestelmän suunnittelun jälkeen tehdään joustavuuden suunnittelu, millä viitataan tulevaisuuden muutosten huomioimiseen. Lisäksi pohditaan, kuinka kehitettyä tuotantojärjestelmää ja koko tuotantokonseptia voidaan muuttaa olosuhteiden muutosten mukaan. Suunnitteluprosessin viimeisenä

vaiheena on tuotantojärjestelmän toteutumisen edellytykset, mikä puolestaan viittaa siihen kuinka yrityksen muut toiminnot voivat tukea uuden tuotantojärjestelmän toimivuutta. Vaihe on merkitty sulkuihin, koska sillä ei ole tässä diplomityössä suurta painotusta. Tuotantojärjestelmän osa-alueiden, esimerkiksi työasemien, yksityiskohtaisempi suunnittelu on edellytys suunnitelman implementoinnille. Onnistunut implementointi vaatii myös tulosten seuraamista ja suunnitelman jatkokehitystä. Nämä osa-alueet on kuitenkin tietoisesti rajattu pois tästä työstä, jossa keskitytään tuotantojärjestelmän suunnitteluun konseptitasolla.

Tässä yhteydessä on esitetty tuotantokonseptin suunnitteluprosessiin sisältyvät vaiheet. Myöhemmin luvussa 4 on esitetty tarkempi kuvaus edellä mainituista osa-alueista ja niihin kuuluvista alavaiheista. Toimintaympäristön huomioiminen suunnitteluprosessia toteutettaessa on tärkeää ja tässä teollisen rakentamisen ympäristöön sijoittuvassa suunnitteluprosessissa painotettavat alueet, erityishuomiot sekä kriteerit johdetaan luvun 3 perusteella.

3. TEOLLINEN RAKENTAMINEN

Teollinen rakentaminen -teoriaosuus toimii tämän diplomityön syvemmin tutkittuna teoriapohjana. Luvussa tutustutaan rakentamisen teollistumiseen, sekä tehdasrakentamiseen. Tehdasrakentamisen osalta teoriaa syvennetään erilaisiin tuotannossa käytettyihin malleihin ja toimintatapoihin sekä syihin, jotka ovat johtaneet tehdasrakentamisen menestykseen tai epäonnistumiseen. Näiden pohjalta johdetaan tämän työn ratkaisuvaihtoehtoisissa painotettavia osa-alueita sekä kriteerejä.

3.1. Rakentamisen erityispiirteet perinteiseen tuotantoon verrattuna

Nam & Tatum (1988, ss. 134–137) erittelevät viisi pääominaisuutta, jotka erottavat rakennukset tavallisista tuotteista. Nämä ominaisuudet ovat liikkumattomuus, monimutkaisuus, kestävyys, kalleus ja suuri sosiaalinen vastuu. Liikkumattomuus on perinteisesti ollut rakennuksen määritelmä, sillä liikuteltavia isoja tuotteita ei ole nimetty rakennuksiksi. Monimutkaisuudella viitataan esimerkiksi siihen kuinka monista eri komponenteista rakennus koostuu. Lisäksi näitä erilaisia komponentteja voidaan yhdistellä eri tavoilla, joten syntyy rajaton määrä erilaisia yhdistelmiä. Tämä taas johtaa osaltaan siihen, että rakennusteollisuudessa tarvitaan laaja-alaisesti erilaista erikoistumista. Rakennuksien tulee kestää erilaisia luonnonvoimia melko pitkän ajan, joten kestävyys on vaadittu ominaisuus. Tämä taas johtaa siihen, että rakennusmateriaalit ovat melko raskaita. Monimutkaisuus ja kestävyys taas johtavat siihen, että rakennukset ovat yleisesti kalliita. Myös rakennusteknologian hidas kehitys johtaa kalleuteen. Suurella sosiaalisella vastuulla viitataan niin yleiseen turvallisuuteen ja terveyteen kuin ympäristön hyvinvointiinkin. (Nam & Tatum 1988, ss. 134–137)

Gann (1996, s. 437) tutkii artikkelissaan jo lähes kaksikymmentä vuotta sitten sitä, kuinka teollinen talotuoantto voisi ottaa oppia autotuotannosta. Esimerkiksi autoteollisuudessa kehitetyistä valmistustekniikoista voisi hänen mukaansa olla hyötyä myös rakennustuotannossa. (Gann 1996, s. 437) Kuitenkin esimerkiksi Henrich & Koskela (2005, s. 1) toteavat, että teollisten tuotantoprosessien työkalujen suora omaksuminen ilman soveltamista rakennusteollisuuteen on johtanut moniin epäonnistumisiin rakennusprojekteissa.

3.2. Rakentamisen teollistuminen

Muiden alojen teollistuessa rakennusala jäi selvästi jälkeen uusien työvoiman tarvetta vähentävien ja tuottavuutta parantavien työtapojen omaksumisessa. Kun 1900-luvun

lopulla lähes kaikissa tehtaissa tavaroiden käsittely tapahtui tietokoneiden avulla, rakennusaineita tuottavissa tehtaissa materiaalienhallinta tapahtui visuaalisesti. Rakennusteollisuudesta onkin tullut työvoimaa sitovin teollisuudenala. Teollistuminen ja massatuotanto ovat mahdollistaneet monien tuotteiden hintojen laskun ja niiden siirtymisen luksustuotteista lähes kaikkien saatavilla oleviksi hyödykkeiksi, mutta asunnot ovat yhä luksushyödyke, johon kaikilla ei ole varaa. (Girmscheid & Scheublin 2010, s. vii)

3.2.1. Teollistuminen

Teollistumisen määritelmä vaihtelee lähteestä riippuen. Kuitenkin teollistumiseen liitetään usein mekaanisen voiman ja työkalujen käyttö, tietokoneohjatut ohjausjärjestelmät ja työkalut, tuotanto jatkuvana prosessina, tuottavuuden jatkuva parantuminen, tuotteiden standardointi, esivalmistus, rationalisointi, modulaarisuus sekä massatuotanto. (Girmscheid & Scheublin 2010, s. viii)

Teollistumiseen liittyy kolme ominaisuutta, jotka ovat ajurit (miksi teollistutaan), edellytykset ja seuraukset. Ajureita ovat tarpeet turvallisuuteen, parempaan laadunohjaukseen, parempaan työterveyteen, parempaan ympäristöstä huolehtimiseen, halvempaan tuotantoon ja osaavan työvoiman puute. Teollistumisen edellytyksiä ovat mekanisoidut, automatisoidut ja älykkäät työkalut. Teollistumisen seurauksia taas ovat massatuotanto, massaräätälöinti, esivalmistus, standardointi ja modulaarisuus. (Girmscheid & Scheublin 2010, ss. viii–ix)

3.2.2. Rakentamisen teollistuminen

CIB:n tutkimusryhmä määritteli teollistumisen rakentamisessa työprosessien rationalisoinniksi niin, että tavoitellaan kustannustehokkuutta ja korkeampaa tuottavuutta sekä laatua (Girmscheid & Scheublin 2010, s. viii).

Nykyään teknologia mahdollistaa sen, että myös rakennusyhtiöt voivat keskittyä yhä enemmän teollistuneisiin prosesseihin ja tuotantomenetelmiin. Suunnitteluun ja työmaalla työskentelyyn on olemassa tietokonetuettuja työkaluja ja -välineitä. Kuitenkin edelleen suurin osa työmaista toimii pääosin käsitöin. Teollinen rakentamisen tarjoamat mahdollisuudet parantavat pienten ja keskisuurten yritysten mahdollisuuksia (Girmscheid 2010, ss. 3–4):

- markkinasuuntautuneisuuteen (keskittymään tiettyihin markkinasegmentteihin, erikoistumaan tiettyihin aloihin laajalla maantieteellisellä alueella sekä kestävien tuotteiden ja palveluiden tarjoamiseen) sekä
- resurssisuuntautuneisuuteen (työn valmistelun yksityiskohtainen suunnittelu, optimoidut prosessit ja organisaatio, esivalmistettujen komponenttien käyttö sekä rakennustapojen ja materiaalinkäytön standardointi).

Näiden toimenpiteiden käyttöönotto mahdollistaa, että yritykset voivat keskittyä toimintakenttiin, jotka tarjoavat eniten lisäarvoa: lisätä arvoa lisäävän työn osuutta ja vähentää tuottamattoman työn määrää, parantaa tuotelaatua ja palvelua, pienentää sisäisiä kustannuksia, parantaa kustannusten läpinäkyvyyttä ja ennustettavuutta sekä mahdollistaa uusille markkina-alueille ja asiakassegmentteihin siirtymisen. (Girmscheid 2010, ss. 3–4)

Girmscheidin (2010, ss. 4) mukaan rakennusteollisuudessa selvästi suurimmat kustannukset aiheutuvat yleensä materiaaleista ja työvoimasta. Näihin molempiin rakennusyrhtiöt pystyvät itse vaikuttamaan. Rakennusurakoiden kustannusjakaumassa arvoa tuottamattomilla toiminnoilla on suuri rooli. Rakentamisen kokonaiskustannuksia voitaisiin siis huomattavasti pienentää vähentämällä tätä turhaa työtä. Rakennustyömaalla turhaa työtä aiheutuu muun muassa tavaroiden siirtelystä edestakaisin, materiaalien etsinnästä, erilaisten ongelmien aiheuttamista työn keskeytyksistä ja poissaoloista. (Girmscheid 2010, ss. 4–5)

Teollistaminen rakennusteollisuudessa voisi vähentää kustannuksia nopeamman rakentamisen, rakentamisen laadun parantumisen, sääriippuvuuden pienentymisen ja suunnittelun sekä rakentamisen koordinoinnin parantumisen kautta. Kun tarkastellaan koko rakennusprosessia ja sen osa-alueita, voidaan huomata, että kaikki osa-alueet ovat potentiaalisia teollistamisen kohteita. Tämä tarkoittaa muotoilun ja rakentamisen suunnittelua, itse rakentamista sekä rakennusmateriaalien, elementtien ja systeemien tuotantoa ja integrointia rakentamiseen. (Van Egmond-de Wilde de Ligny 2010, s. 70)

Teollisen moduulirakentamisen ja perinteisen rakentamisen välillä on huomattavia eroavaisuuksia. Moduulirakentamisessa suuri osa logistisista virroista kulkee tehtaalle, kun taas perinteisessä rakentamisessa työmaa on logistiikan keskus. Moduulirakentamisessa työntekijät voivat olla teollisen tuotannon ammattilaisia, kun taas perinteisessä rakentamisessa työntekijät ovat rakentamisen ammattilaisia. Moduulirakentamisessa suunnitelmien tulisi olla valmiita ja sisältää kaikki tarvittava tieto tuotantoa varten, kun taas perinteisessä rakentamisessa suunnitelmien ei tarvitse olla loppuun asti hiottuja, sillä työntekijät voivat itse päättää kuinka toteuttavat tietyn vaiheen. Tähän liittyen moduulirakentamisessa pyritään siihen, että toteutettu ratkaisu on tekijästä riippumatta sama, kun taas perinteisessä rakentamisessa ratkaisu voi olla tekijäkohtainen. (Sorri & Kähkönen 2013, s. 68)

3.2.3. Teollisen rakentamisen etuja, haittoja ja ongelmia

Girmscheid (2010, ss.12–13) mukaan teollisen rakentamisen hyödyt voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, joita ovat:

Laadun parantuminen: valmistus on säästä riippumatonta; suurempi tuotantomäärä kun käytössä on tehdaskäytännöt; elementin ulottuvuuksien parempi noudattaminen; mahdollisuus vaihdella pinnan ulkonäköä sekä mahdollisuus tehokkaaseen laatujohtamiseen käyttämällä standardoituja ja prosessorientoituneita laadunvalvonnan menetelmiä.

Valmistuskustannusten laskeminen: arvoa tuottamattoman työn vähentyminen, kun käytetään toistuvia ja automatisoituja valmistusprosesseja tehtaassa; esivalmistuksen tehokkuuden parantuminen; työmaatyön kustannusten väheneminen; materiaalisäästöt (ei säästä tai organisatorisista syistä johtuvaa hukkaa) sekä aikaisempi tulojen saanti tuotantoajan lyhentymisen vuoksi.

Tuotantoajan lyhentymisen: teoriassa täysin riippumaton säästä; tehtaassa voidaan rakentaa jo samaan aikaan, kun työmaalla tehdään perustuksia; rakennustyömaalla ei tarvita suurta valikoimaa työvälineitä; lyhyempi suunnittelu-aika sekä pienempi valmistelu-työ, kun tuote voidaan tehdä perustuen jo suunniteltuihin standardeihin tai modulaarisiin elementteihin. (Girmscheid 2010, ss. 12–13)

Pan & Goodier (2012, s. 88) esittävät näiden lisäksi teollisen rakentamisen eduiksi turvallisuuden, ympäristöystävällisyyden ja ennustettavuuden. Baldwin et al. (2009, s. 2067–2068) toteavat, että rakennusteollisuus on jättemateriaalin suurin tuottaja, ja että rakennustuotannon esivalmistusasteen nostaminen vähentää jätemäärää huomattavasti.

Teollisen rakentamisen huonoiksi puoliksi taas voidaan lukea standardoinnin puute alan yrityksissä, mikä voi hankaloittaa yhteistyötä toisten yritysten kanssa; suuremmat kustannukset kuljetuksista, koska kuljetettavat osat ovat suurempia; kokoonpanoon tarvitaan hyvin suorituskypyinen liikuteltava nosturi; esivalmistettujen osien tulee olla mitoitettu kuljetukset huomioiden; kiinteiden kustannusten kasvaminen tuotannon automatisoinnin myötä; korkeammat kustannukset yksittäisten ratkaisujen kohdalla; toleranssiongelmaa, jos yhdistetään rakentamisen eri menetelmin toteutettuja elementtejä. Jotkin ongelmista ovat vältettävissä, jos otetaan käyttöön sopiva markkinointi- tarjousmenetelmä sekä koordinoidaan aikataulutusta, työmaasuunnittelua ja toleransseja. (Girmscheid 2010, ss. 12–13) Teollisen rakentamisen huonoksi puoleksi voidaan nähdä myös aiempien kokeilujen epäonnistumisista aiheutunut maine ja rajoittavat viranomaismääräykset (Blismas & Wakefield 2009, s. 77). Pan & Goodier (2012, s. 89) tuovat esiin myös taloudellisen laskusuhdanteen aiheuttamien säästöjen vaikutuksen teollisen rakentamisen läpilyöntiin.

Johnsson & Meiling (2009, ss. 668–673) esittelevät artikkelissaan tuloksia tutkimuksesta, jossa he tarkastelivat kahta ruotsalaista moduulivalmistajaa. Tarkoitus oli tutkia millaisia epäkohtia moduuleissa ilmeni tehtaalla tai asennuksen jälkeen. Yritysten valmistamat moduulit olivat puurunkorakenteisia. Epäkohtia olivat esimerkiksi työntekijöiden aiheuttamat reiät ja sotkut seinillä, puuttuvat vuoraukset ikkunoiden ja ovien ympäriltä tai ovien uudelleen säätämisen tarve rakenteiden liikkumisen takia. Tutkituissa yrityksissä ovet ja ikkunat olivat moduulin eri osista useimmin epäkohtien aiheuttajia. Tähän nähtiin osasyys se, että nämä ovat kalliita hankintoja sekä vaativat pitkät toimitusajat, jonka vuoksi niiden hankinnoissa oli tehty kompromisseja. Arvioitaessa epäkohtia niiden vaikeusasteen perusteella, materiaalien ja osien puuttuminen ennen moduulien toimitusta aiheutti lähes puolet tehtaalla ilmenneistä ongelmista. Lisäksi rikkoutuneet osat,

jotka tuli korjata ennen toimitusta, aiheuttivat paljon ongelmia. (Johnsson & Meiling 2009, ss. 668–673)

Rakentamisen työntensiivisyydestä johtuen monet moduulirakentamisen ongelmat ovat peräisin sekä tuotannossa että työmaalla asennusvaiheesta tapahtuvista inhimillisistä virheistä. Myös puurakenteiden valintaa on kritisoitu ja myös Johnsson & Meilingin tutkimuksessa nousi esiin, että takuutarkastuksissa rakenteista johtuvia epäkohtia oli noin puolet epäkohtien kokonaismäärästä. Yleensä nämä johtuivat halkeamista kulmissa tai rakenteen liikkumisesta. Yleisesti tarkasteltuna lopputarkastuksissa havaituista vioista noin puolet oli aiheutunut tuotannossa, 35 % työmaalla tapahtuneessa asennuksessa, 10 % kuljetuksien ja nostojen aikana ja loput suunnitteluvaiheessa. (Johnsson & Meiling 2009, ss. 674–678) Vaikka moduulituotannossa havaittiin monia epäkohtia, kokonaisuudessa kuitenkin lopputarkastuksissa ilmeni vähemmän epäkohtia kuin vertailukohtana olleissa kuudessa perinteisen rakentamisen projektissa (Johnsson & Meiling 2009, s. 679).

Pan et al. (2012) ovat tehneet tutkimusta perinteisen ja teollisen rakentamisen eduista ja haitoista. He toteavat, että selkeitä arvopohjaisia valintakriteereitä ei ole olemassa näiden kahden rakentamistavan vertailuun. Tämä taas aiheuttaa sen, että kaikkia teollisen rakentamisen hyötyjä ei vielä tiedosteta. (Pan et al. 2012, s. 1239)

3.2.4. Esivalmistuksen tasot

Teollistumisessa ensimmäisenä vaiheena nousee yleensä esiin esivalmistus. Esivalmistetulla komponentilla tarkoitetaan komponenttia, jota on jo työstetty tiettyyn vaiheeseen. Rakennusteollisuudessa esivalmisteet voivat olla rakennustyömaalla tehtyjä tai tehtaalla tehtyjä ja siitä työmaalle koottavaksi kuljetettavia. Systemiteorian mukaan esivalmisteet voidaan jakaa kuuteen eri valmiusasteeseen, joita ovat (Girmscheid & Scheublin 2010, ss. 7–8):

Puoliesivalmistetut rakenteelliset elementit, jotka ovat rakenteellisia elementtejä, betonin muottilaudoituksia tai yhdistelmäelementtejä.

Esivalmistetut rakenteelliset elementit, jotka on valmistettu tehtaassa ja kuljetettu rakennustyömaalle, jossa liitetään yhdistämistä varten tarvittavat komponentit ja tehdään viimeistelytyöt.

Esivalmistetut integroidut elementit, jotka ovat toiminnallisia elementtejä (kuten seinä, johon on asennettu eristys ja talotekniikkaa varten tarvittavat komponentit ja joka on viimeistelty). Nämä tehdään tehtaassa ja kuljetetaan työmaalle yhdistettäväksi muihin komponentteihin.

Esivalmistetut rakenteelliset huonemoduulit, jotka ovat samanlaisia kuin esivalmistetut rakenteelliset elementit, mutta muodostavat kokonaisen huoneen.

Esivalmistetut valmiit huonemoduulit, jotka ovat useista elementeistä ja komponenteista koostuvia yksiköitä. Nämä voivat myös olla loppuun asti viimeisteltäviä.

Rakennusjärjestelmät, jotka ovat pitkälle kehitettyjä platform -tyyppiseen ajatteluun perustuvia järjestelmiä. Näissä asiakas voi itse melko itsenäisesti tietyistä vaihtoehtoista päättää elementit ja komponentit, joista järjestelmä tulee koostumaan. Järjestelmä voi olla rakenteellinen elementti tai huonemoduuli. (Girmscheid 2010, ss. 7–8)

Platform systeemi viittaa perusviitekehykseen, jossa tietyt ominaisuudet kuten moduulien mitat, liitännäisyksityiskohdat, materiaali- tai komponenttitiheydet ovat standardoituja, mutta mahdollistavat silti jokaisen komponentin yksilöllisen muotoilun. (Girmscheid 2010, s. 11)

Sisällön integraation määrä koskee sitä, kuinka paljon alun perin erillisten rakennusosien tarjoamia ominaisuuksia on yhdessä komponentissa tai moduulissa. Esimerkkinä sisällön integraation asteesta voidaan kuvata seinää. Betoniseinän tarkoitus on tukea rakennusta. Betoniseinän, johon on laitettu eristys, tarkoitus taas on tukea rakennusta ja eristää lämpöä. Betoniseinän, jossa on eristys, talotekniikkaa varten tarvittavat johdot ja maalaus tai tapetointi, tarkoitus on tukea rakennusta, eristää lämpöä ja mahdollistaa tietokoneiden ja television tarvitsemat yhteydet ja sähkön jakelu asunnossa. Kun sisällön asteen määrä nousee, myös suunnittelun ja koordinoinnin tarve kasvaa. Myös esivalmistuksen mahdollisuus kasvaa, kun sisällön integraation aste kasvaa. (Girmscheid 2010, s. 9)

Tilaan liittyvä integraatio kuvaa komponentin, moduulin tai järjestelmän kompleksisuutta liittyen alueelliseen ulottuvuuteen, osajärjestelmiin ja niihin liittyviin rajapintoihin. Tilaan liittyvän integraation asteen nousua voidaan kuvata esimerkillä, jossa aluksi ovat yksittäiset tuet ja kannatinpalkit, joiden päässä on ennalta määrätyt liitännät. Kattotuoli, joka koostuu yksittäisistä tuista ja kannatinpalkeista, joissa on ennalta määrätyt kytkökset kattotuolin vahvistuksiin. Kattosysteemi, joka koostuu esivalmistetuista kattotuoleista ja vahvistuksista. Viimeisessä esimerkissä kattosysteemi koostuu erillisistä moduuleista ja elementeistä. (Girmscheid 2010, s. 9)

Elementtien ja moduulien sisällön ja tilaan liittyvän integraation asteella esivalmistuksessa on kaksi päänäkökulmaa. Ensimmäinen on, että riippumattomuuden, sisällön ja tilan kasvaessa sarjakoot pienenevät. Toinen on, että sisällön ja tilan kasvaminen lisää rahallista arvoa tehtaan järjeistämisen johdosta. (Girmscheid 2010, s. 10)

Modulaarinen järjestelmä on rakenteellinen periaate, joka mahdollistaa erilaisten yhdistelmien rakentamisen erilaisten standardoitujen rakennuselementtien ja systeemien koostelmasta. Näitä standardoituja elementtejä ja järjestelmiä yhdistellään halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. Erilaisia kombinaatioita saadaan aikaan käyttämällä erilaisia modulaarisen järjestelmän elementtejä, eri määrää samoja komponentteja tai samaa määrää samoja elementtejä, mutta eri järjestyksessä. (Girmscheid 2010, s. 10)

Modulaariset järjestelmät voidaan jakaa suljettuihin ja avoimiin järjestelmiin. Suljetussa järjestelmässä elementit suunnitellaan yhtenäiseksi kokonaisuudeksi, käytettäväksi vain kyseiseen kokonaisuuteen. Suljetussa järjestelmässä ei ole mahdollista käyttää järjestelmän ulkopuolisia elementtejä. Elementit voidaan kuitenkin tuottaa eri valmistajilla. Avoimessa järjestelmässä taas on vaihtoehtoisia eri valmistajien tuottamia elementtejä. Avoimessa järjestelmässä käytetään ennalta määrättyjä liitäntöjä, jotka voidaan yhdistää järjestelmän ulkopuolisiin elementteihin. Avoin järjestelmä tarjoaa laajan valikoiman erilaisia vaihtoehtoja. (Girmscheid 2010, s. 11)

3.2.5. Teollisen rakentamisen eri asteet

Teollistaminen ei välttämättä tarkoita samaa kuin massatuotanto, vaan se sisältää yleensä viisi eri astetta: esivalmistus, mekanisointi, automaatio, robotisointi ja uusimistuotanto. Ensimmäiset neljä astetta ovat vielä hyvin pitkälle perinteisen rakentamisen vaikutteiden alaisena. Niistä esivalmistuksen pyrkimykset kohdistuvat fyysiseen sijaintiin kun taas kolme viimeistä pyrkivät korvaamaan työvoiman koneilla. Uusimistuotanto taas on innovatiivisempi lähestymistapa, jolla pyritään yksinkertaistamaan ja järjeistämään koko rakennustuotantoprosessia. (Richard 2010a, s. 15)

Esivalmistus rakennustuotannossa tarkoittaa usein sitä, että komponentteja, alikokoonpanoja tai moduuleja valmistetaan tehdasolosuhteissa. Käytännössä kuitenkin usein on käytössä samat työmenetelmät ja -materiaalit. Kuitenkin jo tällä voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä. Mekanisoinnin tarkoitus on helpottaa työntekijöiden työtä työkaluin, materiaalinkäsittelyvälinein tai nostimin. Automatisoinnissa työväline hoitaa koko työvaiheen itsenäisesti. Tuote voi esimerkiksi liikkua hihnalla eri koneelta toiselle, joista jokainen suorittaa tietyn työvaiheen. Robotisointi taas tarkoittaa, että työkonetta pyste moniakselisesti hoitamaan erilaisia työvaiheita itsenäisesti. Tämä on hyvin tehokasta tarkkuuden ja nopeuden suhteen, mutta vaatii suuria alkuinvestointeja. Uusimistuotannossa pyritään koko tuotantoprosessia kehittämään niin, että voitaisiin luopua monimutkaisista työvaiheista ja yksinkertaistaa jokaista työvaihetta niin, että koko prosessi olisi lopulta tehokkaampi. Tämä vaatii usein paljon ideointia ennen toteutusta ja sisältää muita teollistamisen asteita. (Richard 2010a, s. 16)

Richard (2005 s. 444) tuo artikkelissaan esiin uusimistuotannon merkityksen rakennusteollisuuden teollistamisessa. Hänen mukaansa yleisesti teollistamisen kehityspolku menee niin, että investoidaan heti alkuun huomattavia summia automaatioon ja robotisointiin. Kuitenkin tärkeämpää olisi ensin etsiä ja kehittää ideoita, joiden avulla saataisiin luotua yksinkertaistettu prosessi. Uusimistuotanto ei useinkaan ole kuitenkaan täysin itsenäinen kokonaisuus vaan sisältää vaikutteita myös muista teollistamisen asteista. (Richard 2005, s. 444)

Richard (2005, s. 445) esittelee artikkelissaan kolmevaiheisen mallin, jonka avulla rakennusteollisuuden prosesseja voidaan kehittää kohti uusimistuotantoa. Mallin kolme vaihetta ovat (Richard 2005, s. 445):

1. Kehitetään tuote suoritusnäkökulmasta. Ei pohdita, että mikä tuote on ollut vaan mitä tuotteen kuuluisi tehdä.
2. Valitaan prosessi, joka yksinkertaistaa materiaalinkäsittelyä.
3. Suunnitellaan prosessi ja tuote niiden keskinäisten vaikutusten mukaan.

Ensimmäisen vaiheen tarkoitus on, että jos halutaan parantaa prosessia, tulee tuotetta tarkastella systemaattisesti ja erottaa oleelliset ominaisuudet sattumalta muotoutuneista. Kun erotetaan asiakkaan tarpeet, voidaan muodostaa funktionaalinen malli tuotteelle. Lähtökohtana on, että mallin tulee olla suoraviivainen ja yksinkertainen, jos halutaan saada aikaiseksi järkevä prosessi. Teollisessa rakentamisessa tuotteet eivät ole rakennuksia vaan rakennusjärjestelmiä. Ne koostuvat osien ja sääntöjen kokonaisuuksista, joita käytetään uudelleen erilaisten lopputuotteiden aikaansaamiseksi. Niinpä rakentamista ei keksitä uudelleen joka kerta, kun uutta rakennusta tehdään. Tämä on kuitenkin tilanne vielä tyypillisten työpiirrosten osalta perinteisessä lähestymistavassa. Rakennuksen päätehtävät muodostavat osakokonaisuuksia, jotka voidaan yhdistää samaan komponenttiin tai osakokoonpanoon. Kun ne valmistetaan erikseen, mahdollistetaan kokoonpano vakioituilla rajapintakäytännöillä tai liitännöillä. (Richard 2005, s. 446)

Tuotteen yksinkertaistamisen jälkeen voidaan suunnitella, kuinka tuotteissa, komponenteissa tai osakokonaisuuksissa käytettävien materiaalien käyttöä voidaan järkeistää. Tavoitteena on, että voidaan yhdistää tiettyjä prosesseja ja materiaaleja, jotta osakokoonpanojen ja koko tuotteen valmistus yksinkertaistuu. Esimerkkejä tästä ovat monitoiminen materiaali, jolla voidaan korvata useita erilaisia materiaaleja; pyrkimys kehittää yksittäinen elementti kokonaisuudesta, joka yleensä vaatii useita osia ja asennuksia; kerralla monimutkaisista tehtävistä suoriutuvien työkalujen käyttöönotto; mittojen vakiointi osien liittämisen helpottamiseksi ja useiden osakokoonpanojen teettäminen samanaikaisesti useilla alihankkijoilla tehokkuuden lisäämiseksi. (Richard 2005, s. 447)

Richardin (2005, s. 447) mallin kolmas vaihe korostaa tuotteen ja prosessin yhteyttä. Mielikuva uudesta tuotteesta tulisi olla pääosassa prosessin kehittämisessä. Uusi tuote ei välttämättä ole lainkaan edeltäjänsä kaltainen, ja onkin suotavaa kehittää tuotetta ja prosessia jatkuvasti. Kuitenkin esimerkiksi arkkitehtuurissa on yleisesti omistauduttu vahvasti perinteisille muodoille. Monet modulaaristen rakennusten valmistajat pyrkivätkin piilottamaan moduulien olemassaolon modulaarisia rakennuksia kohtaan vallitsevan epäluulon vuoksi. (Richard 2005, s. 447)

3.3. Lean rakentaminen

Lean rakentaminen on prosessijohtamisen keino, joka tarjoaa hallintaa koko rakentamisprojektin ajan tähdäten virtaavaan tuotantoon (Björnfot & Stehn 2004, s. 6). Lean-ajattelu on johtamisfilosofia, jonka periaatteita ovat JIT(Just In Time) -tuotanto, sisäänrakennettu laatu ja jatkuva parantaminen, sitoutuminen ja pysyvyys sekä standardointi. JIT -tuotantoon liittyviä elementtejä ovat layout, asennusajat, aikataulut ja pienet eräkoot. Laatuun ja jatkuvaan parantamiseen kuuluu hukan poistaminen, vikoihin reagointi, virheiden ennaltaehkäisy ja jatkuva parantaminen. Sitoutumisen keinoja ovat tiimityöskentely, moniosaavat työntekijät, laadukas johtaminen, jaettu vastuu ja motivaatio. Pysyvyyteen ja standardointiin taas liittyy työskentelytilojen huolto, visuaalinen tieto, työvälineiden huolto ja standardoitu työ. (Höök & Stehn 2008, s. 1095)

Käytännössä perinteisesti rakennustuotannossa on ollut projektilähtöinen ajatusmalli. Teollinen rakentaminen taas on prosessilähtöistä, kuten autoteollisuuskin, josta lean-ajattelutapa on peräisin. Teollinen rakentaminen siis omaa piirteitä molemmista, mikä on tärkeä lähtökohta mikäli lean-periaatteita halutaan soveltaa teolliseen rakentamiseen. (Höök & Stehn 2008, ss. 1092–1093)

Lean-menetelmien käyttöä rakentamisessa voidaan kuvata niin, että mikäli niitä käytetään projektin alkuvaiheessa, hyödyt saavutetaan karkeassa suunnittelussa. Mikäli menetelmiä sovelletaan lähtökohtaisessa suunnittelussa, hyödyt saavutetaan suunnitelmien kehittämisessä. Edelleen jos suunnitelmien kehittämisen vaiheessa käytetään lean-menetelmiä, niiden hyödyt saavutetaan tuotantovaiheessa. Hoikkaan rakentamiseen liittyvät vahvasti myös käsitteet modulaarisuus ja rakennettavuus. Tuotteen modulaarisuuden vaikutukset edistävät rakennettavien suunnitelmien syntymistä ja lean-menetelmät edistävät rakennettavaa prosessia. Lean-toimintatavat taas suosivat, mutteivät välttämättä edistä, modulaarisuutta kun taas tuotemodulaarisuus edistää lean-rakennusprosessia. (Björnfot & Stehn 2004, s. 7)

Björnfot & Stehn (2004, s.12) tutkivat lean-periaatteiden soveltuvuutta Ruotsin rakennusteollisuudessa ja totesivat, ettei se ollut vielä tuolloin tarpeeksi kypsä omaksumaan täysin lean-filosofiaa sellaisenaan. He suosittelivatkin keskittymään mieluummin modulaariseen tuoterakenteeseen. Myös Höök & Stehn (2008, s. 1091) ovat tutkineet lean-periaatteiden ja -käytäntöjen soveltuvuutta teolliseen rakentamiseen Ruotsissa. Tehdasrakentamisessa on heidän mukaan selviä merkkejä teollisesta tuotannosta, mutta täysin integroidut lean-tuotantokäytännöt ovat harvinaisia. Heidän mukaansa lean-käytäntöjen käyttöönotto vaatii erityisen paljon, jos tehtaaseen siirretään perinteisen rakentamisen ammattilaisia, jotka ovat tottuneet alan ajattelumalleihin. Kaksi pääestettä lean-toimintamallien hyödyntämiselle rakennusteollisuudessa vaikuttaisivat olevan erilaisten muuttujien aiheuttamat epävarmuudet ja tuotannon epävakaisuus sekä osapuolien asenteet kuten muutosvastarinta. (Höök & Stehn 2008, ss. 1091–1098)

Teollisessa rakentamisessa on kuitenkin jo havaittavissa lean-elementtejä, kuten koko rakentamisen arvoketjun hallinta, vakaa ja pysyvä organisaatorakenne sekä toimintojen toistuvuus. Lean-periaatteiden hyödyntämisen lisääminen olisi siis mahdollista teollisessa rakentamisessa. Perinteisen rakentamisen kulttuuri hidastaa lean-periaatteiden käyttöönottoa ja siksi tulisikin panostaa lean-kulttuurin syntymiseen. Tähän vaaditaan johtajuutta, joka tähtää työntekijöiden korkeampaan motivaatioon ja vastuuseen, virran, luontaisen laadun ja jatkuvan parantamisen osalta. Lisäksi tulee kehittää työn, layoutin ja työvälineiden huollon standardointia, jotta voidaan saavuttaa virta, laatu, kehitys ja työmotivaatio. Nämä vaatimukset ovat vahvasti kytköksissä johtoon. Kuitenkin työntekijöiden tulee kokeilla uusia lean-käytäntöjä, jotta he voisivat uudistaa mielikuvansa niiden toimivuudesta. (Höök & Stehn 2008, ss. 1091–1098)

Vaikka Ballard et al. (2001, s. 14) korostavat myös työtehtävän, virtaamisen ja arvon merkitystä rakennustuotannossa, ovat he kuitenkin sitä mieltä, ettei ole tarkoituksenmukaista pitää lean-ajattelumallia pohjana rakennustuotannolle. Mullensin (2011, s. 38) mukaan autoteollisuudesta lähtöisin oleva lean on hyvin käyttökelpoinen filosofia myös modulaariseen rakentamiseen. Hän korostaa etenkin standardisoinnin, stabilisoinnin, JIT-tuotannon ja henkilöstön sitoutuneisuuden merkitystä. Vaikka myös Gibb (2001, s. 315) toteaa teollisen tuotannon keinojen, kuten standardisoinnin, soveltamisen tärkeyden, hän kuitenkin muistuttaa, että talot eivät ole autoja ja yhtäläistävä vertailu tulee suorittaa harkiten.

3.4. Modulaarinen rakentaminen

Rakennussysteemit voidaan jakaa kolmeen ryhmään joita ovat työmaaintensiivinen osasetti, tehtaassa tehty kolmiulotteinen moduuli ja näiden kahden hybridi (Richard 2010b, ss. 304–305). Tässä alaluvussa käsitellään kolmiulotteisia moduuleja ja niiden rakentamista. Mentäessä kohti yhä suurempaa esivalmistuksen astetta rakennukset tehdään valmistamalla ne tehtaalla täysin kokoonpantuina suurtilaelementteinä eli moduuleina, jotka sitten työmaalla yhdistetään infrastruktuuriin ja toisiinsa (Richard 2010b, s. 305).

3.4.1. Modulaarinen rakennus

Rakennuksella, joka koostuu tehdasvalmisteisista 3D-moduuleista, tarkoitetaan rakennusta, jonka kaikki tilat ja elementit on kokonaan tehty, kokoonpantu ja viimeistelty tehtaalla kolmiulotteisiksi rakenteellisiksi moduuleiksi, jotka työmaalla vaativat vain yksinkertaisia liittämisiä perustuksiin ja toisiinsa (Richard 2010b, s. 308). Moduulityyppejä, joista rakennus voi koostua, on kaksi: osista koottava moduuli ja riippumaton moduuli. Osista koottava moduuli on pieni ja helposti kuljetettava, mutta vaillinainen, sillä se vaatii työmaalla täydennyslementtejä tai prosesseja. Riippumaton moduuli taas on itsenäinen täysin valmis moduuli. (Richard 2010b, ss. 309–310)

Modulaariset rakennukset ovat rakenteeltaan erilaisia valmistajasta riippuen. Esimerkiksi Richard (2005, s. 448) esittelee konseptin, joka perustuu siihen, että yleisesti palveltavat tilat (olohuoneet, ruokahuoneet ja makuuhuoneet) varaavat suurimman osan (70–80%) rakennuksien pinta-alasta, kun taas palvelevat tilat (keittiöt, kylpyhuoneet, naistenhuoneet, pyykkihuoneet, porraskäytävät, hissikuilut ja tekniset tilat) vievät vain noin 20–30% pinta-alasta. Tämän perusteella on kehitetty modulaarisen rakentamisen malli, jossa sarja palveluytimiä toimii rakennuksen kantavana seinärakenteena tukien palveltavia tiloja niiden välissä. Nämä palveluytimet ovat tehdasvalmisteisia modulaarisia osakokoonpanoja, jotka sisältävät kaikki palvelevat tilat. (Richard 2005, s. 448)

3.4.2. Rakennusmoduulitehtaan suunnittelu

Luvussa 2.4. todettiin, että tuotantokonseptin suunnitteluprosessimenetelmä itsessään ei teollisen rakentamisen ympäristössä eroa huomattavasti perinteisessä teollisuudessa käytetystä. Kuitenkin suunnitteluprosessin aikana on huomioitava useita seikkoja johtuen teollisen rakentamisen ympäristön eroavaisuuksista perinteiseen tuotantoon verrattuna.

Modulaarisen rakentamisen tuotantostrategian lähtökohtana tulisi olla jo saavutettujen modulaarisen rakentamisen etujen ylläpito ja kehittäminen sekä toisaalta haasteiden ja ongelmien kohtaaminen. Yksi suurimpia näistä haasteista on ratkaista kuinka modulaarisen rakentamisen kustannuksia voidaan alentaa ilman, että riskeerataan laatua, työntekijöiden turvallisuutta tai asiakkaiden arvostamaa räätälöinnin mahdollisuutta. (Mullens 2011, s. 29)

Moduulitehtaan suunnitteluprosessissa on tärkeää, että yrityksen kaikista toiminnoista päättävät henkilöt osallistuvat suunnitteluun. Tuotanto liittyy välittömästi tai välillisesti kaikkiin toimintoihin ja siihen liittyviä päätöksiä tulee tehdä ainakin myynnin ja markkinoinnin, suunnittelun, hankintojen valmistuksen, henkilöstövoimavarojen, laadun sekä rahoituksen ja taloushallinnon osalta. (Mullens 2011, ss. 223–224)

Kazi et al. (2009) esittää, että rakennusmoduulitehtaan lähtökohtana ei välttämättä tarvitse olla monimutkainen ja uusi teknologia, joka vaatii huomattavaa investoitavaa pääomaa. Kohtuuhintaisilla matalan teknologian ratkaisuilla voidaan myös luoda kokonaisuus, joka vastaa valmistettavan tuotteen vaatimukset. Toimintaa ohjaava tekijä tulisi olla tehokkaan, kysynnän mukaan joustavan ja kustannustehokkuutta, läpäisyaikaa sekä työntekijöiden turvallisuutta parantavan ympäristön luominen. (Kazi et al. 2009, s. 36) Vastaavasti Richard (2005, s. 451) toteaa artikkelissaan, että suunnittelussa tulisi korostaa enemmän ideoita kuin laitteistoa.

Kazi et al. (2009, s.36) mukaan tietyt periaatteet ovat tärkeitä rakennustehtaan suunnittelussa. Lean-periaatteet ja tuotantoa sekä kokoonpanoa tukeva suunnittelu (DFMA) tulisivat olla keskeisiä päätöksentekoprosesseissa. Suunnitteluosaston ottaminen mukaan jo aikaisessa vaiheessa tehtaansuunnittelua helpottaa tekemään oikeita päätöksiä

automaation, prosessiteknologian, miehityksen, logistiikan, tuote- ja prosessijoustavuuden sekä kokoonpanon suhteen. (Kazi et al. 2009, s. 36)

Myös Arif et al. (2012, s. 78) esittää yhteneviä mielipiteitä teknologiaratkaisuista ja suunnitteluosaston merkityksestä tuotannon suunnittelussa. Vaikka korkea automaation aste teollisen rakentamisen tuotannossa olisi heidän tutkimuksensa mukaan hyödyllistä, tulisi tuotannon suunnittelussa keskittyä arvoa tuottaviin toimintoihin kuten visualisointiin ja simulointiin. Tuotannon tulee myös työskennellä tiiviimmin suunnittelun ja työmaan kanssa. Artikkelissa esitetään, että teollisen rakentamisen valmistuksen suunnittelussa tärkeimmässä roolissa tulisi olla prosessit, tärkeässä roolissa ihmiset ja pienimmässä roolissa teknologia. (Arif et al. 2012, s. 78)

Mullens (2011, s.30) puolestaan esittää, että modulaarisen tuotantostrategian tulisi keskittyä viiteen osa-alueeseen. Nämä ovat toimitusketjun hallinta, kapasiteetin hallinta, lean-tuotanto, laadunohjaus ja massaräätälöinti. Näistä kapasiteetin hallinta, lean-tuotanto ja massaräätälöinti liittyvät suoraan rakennusmoduulitehtaan suunnitteluun. (Mullens 2011, s. 30)

Kapasiteetin hallinnan tärkeydellä Mullens (2011, s. 31) viittaa siihen, että kysynnän riittäessä tuotantomäärien kasvattaminen jakaa yleiskustannuksia suuremmalle tuotemäärälle, jolloin tuotekohtaiset kustannukset laskevat. Tuotantokapasiteettia voidaan kasvattaa esimerkiksi lisäämällä työtunteja ylityöllä tai toisella vuorolla tai vaihtoehtoisesti parantamalla tuottavuutta. Ylityön teettäminen on työvoimakustannuksiltaan kallista ja sitä tuleekin käyttää vain lyhytaikaisesti. Toisaalta myös toisen vuoron lisääminen voi aiheuttaa ongelmia työntekijöiden palkkaamisen, iltalisien tai vuorovaihtojen sujuvuuden suhteen. Tuottavuutta voidaan parantaa esimerkiksi lyhentämällä tuotannon läpäisyaikaa kehittämällä työvaiheita tai koko tuotantoprosessia. (Mullens 2011, s. 31)

Kapasiteetin hallinnan lähtökohtana tulee olla kysynnän ja tuotantomäärän kasvun synkronointi alkupääoman tarve minimoiden. Käytännössä tämä tarkoittaa, että aloitetaan tuotanto pienessä tehtaassa, jonka jälkeen lisätään kapasiteettia asteittain tarvittaessa. Tämän takia on tärkeää, että tehdasta suunniteltaessa huomioidaan mahdollinen tuleva tarve kapasiteetin lisäämiseen ja tehdään ratkaisut joustaviksi ja helposti muokattaviksi. (Mullens 2011, ss. 31–32) Lean-tuotannon keinoista Mullensin (2011, s. 38) mukaan moduulitehtaan suunnittelussa kannattaa pyrkiä korostamaan standardisointia, stabilisointia, JIT -tuotantoa ja henkilöstön sitoutuneisuutta. Kriittisen polun menetelmä on hyödyllinen työkalu moduulituotannon työvaiheiden analysointiin. (Mullens 2011, ss. 33–38)

Massaräätälöinti on keino suunnitella ja valmistaa räätälöityjä tuotteita massatuotannon tehokkuudella ja nopeudella. Modulaarisessa rakentamisessa voidaan massaräätälöintiin pyrkiä käyttämällä modulaarista tuotearkkitehtuuria, räätälöivien työvaiheiden siirtoa tuotannon loppupäähän tai suunnittelemalla joustava tuotantoprosessi. Joustavassa tuo-

tantoprosessissa tarkoitus on muuttaa prosessia niin, että se ei reagoi tuotevariaatioihin herkästi. Tehokkainta tietenkin on jos hyödynnetään kaikkia edellä mainittuja keinoja yhteen sovittaen. (Mullens 2011, ss. 40–41)

Mullens (2011, s. 42) toteaa, että työntekijöiden liikuttelu tukee tuotannon sujuvaa virtaamista. Kun työntekijät voivat oman työtehtävänsä tehtyään auttaa lähellä olevia työntekijöitä saattamaan työvaiheensa loppuun, voidaan tasapainottaa kierrosaikojen vaihteluista johtuvat heilahdukset. Hän esittää, että tehtaassa voidaan jopa käyttää työntekijöitä, jotka on nimetty nimenomaan auttamaan muita työntekijöitä tai työntekijätimejä. (Mullens 2011, s. 42)

Ballard et al. (2001, s. 1) toteavat, että yleisesti tuotantokonseptin suunnittelussa tärkeää on pitää ohjaavana tekijänä tuotannon kolmea tavoitetta: työn suorittamista, arvon maksimointia ja hukan minimointia. Rakennustuotannossa arvon maksimoinnin keinona voi olla asiakkaiden tarpeen paremmin täyttävien tuotteiden toimittaminen ja projektien toteuttaminen aikataulussa sekä tahtiaikojen variaatiota tasoittamalla. Hukan vähentämisen keinoina taas voidaan pitää puutteellisten tuotteiden vähentämistä, materiaalien ja tiedon virtauttamista sekä ”vähemmästä enemmän” -ajatusmallin soveltamista. Itse työn suorittaminen tavoitteena on usein liiankin itsestään selvää, joten siksi sitä tulee korostaa. (Ballard et al. 2001, ss. 4–7)

Roy et al. (2004, s. 57) tuovat esiin rakennustuotannossa esiintyneen epäkohdan. Heidän mukaansa rakennustuotannon kehitys on perinteisesti tapahtunut muodollisen toimintatapojen analysoinnin sijaan lähinnä kokeilun ja erehdyksen kautta. Alalla onkin puute standardeista, prosessien tarkastelumenetelmistä ja tiedon sekä hyvien käytäntöjen jakomenetelmistä. Teollistumisen tärkeä ominaispiirre on hyvin kuvattujen prosessien olemassaolo, jotta työntekijät voivat omaksua ne ja jotta niitä voidaan käyttää pohjana tehokkuuden ja laadun parantamiseen. Rakennusteollisuudessa prosessien dokumentoinnin luominen, ylläpitäminen ja jakaminen auttaisivat tarkastelemaan ja standardoimaan talonrakennusprosessia, parantamaan kommunikointia laatustandardeista, kannustamaan tiimityöskentelyä ja käsittelemään tehokkaasti tuotevariaatioiden tietoa massaräätälöinnin tueksi. (Roy et al. 2005, ss. 57–58)

Dokumentaation tulisi pitää sisällään ainakin toiminnon kuvaus, turvallisuustekijät, valmistuspäivämäärät, palauteosio, laatutekijät, kirjallinen kuvaus, materiaalit, materiaalien määrä, toiminnon soveltaminen sekä versio- ja muutostiedot. Tärkeää on huomioida, että työkuvaukset ovat selkeitä, liian pitkiä tekstejä vältetään, keskitytään laadun, tehokkuuden ja turvallisuuden kannalta kriittisiin osiin ja ymmärrettävyyttä lisätään kuvallisilla hahmotelmilla. Yhdenmukaisuus kaikissa työohjeissa koko yrityksen ja projektin sisällä on ehdoton vaatimus. Dokumentaatioiden tulisi myös pyrkiä kokoamaan hajallaan olevaa tietoa yhteen lähteeseen. (Roy et al. 2005, ss. 58–60)

Kun toimitaan monimutkaisien modulaarisuutta sisältävien tuotteiden kanssa, prosessien ja tuotteiden välisten suhteiden kuvaaminen vaatii erityishuomiota. Kunnolliset tarkastusmenettelyt tulee olla selvillä organisatorisella ja järjestelmätasolla, kun useampia versioita prosessista on samanaikaisesti käytössä tai kehityksessä. Dokumentaatiojärjestelmällä on tärkeä rooli teknologioiden, prosessien ja työmenetelmien kehittymisessä. (Roy et al. 2005, s. 66)

Autoteollisuudessa käytössä oleva vakioitujen komponenttien ja osakokoonpanojen käyttö helpottaisi myös rakennustuotantoa saamaan tuotantoon lisää tehokkuutta, samalla kun räätälöitävyys ja tuotannon joustavuus säilytettäisiin. Käyttämällä valmiiksi suunniteltuja komponentteja ja osakokoonpanoja voitaisiin tuottaa erilaisia rakennuksia asiakkaiden toiveiden mukaan ja säästää huomattavasti suunnitteluun kuluva ajasta sekä kustannuksista. Kuitenkin rakennusteollisuudessa tarvittavien komponenttien määrä ja asiakkaiden vaatimukset räätälöinnin asteelle ovat huomattavasti korkeampia kuin autoteollisuudessa, joten esimerkiksi autoteollisuudessa paljon käytettyä kanban -järjestelmää ei ole aina mahdollista hyödyntää rakennustuotannossa. (Gann 1996, ss. 447–448)

3.5. Käytännön esimerkkejä tehdasrakentamisesta

Teollisesta rakentamisesta on ollut hyviä ja huonoja kokemuksia ja siihen suhtaudutaan edelleenkin ristiriitaisesti. Kuitenkin teollisen rakentamisen keinot ovat laajasti käytössä modernissa rakennustuotannossa ja sen tuomat hyödyt rakentamiseen on pantu merkille. Hyödyistä huolimatta näiden keinojen käyttöönotto rakennustuotannossa saattaa monimutkaistaa tuotantoprosessia. Tällöin vaaditaan myös suurempia alkuinvestointeja, jotta prosessi saadaan etenemään sujuvasti. Suunnittelijoilta teollisen rakentamisen keinojen käyttöönotto vaatii myös enemmän ja tarkempaa työtä, mikä tulee huomioida suunnitteluun varatussa ajassa. Rakennusalaalla suurin osa toimijoista on pieniä ja keskisuuria yrityksiä. Tehdasrakentamiseen liittyvä teknologia ja tietämys eivät ole kovin hyvin järjestettyjä eivätkä kokemukset dokumentoituja, mikä hidastaa tehdastuotannon leviämistä. (Girmscheid & Scheublin 2010, s. 73) Seuraavassa on vertailun vuoksi esitetty talotehdas-esimerkkejä Japanista, jossa teollinen rakentaminen on yleistynyt jo 1970-luvulta lähtien ja toisaalta ruotsalaista talotehdasmallia joka ei onnistunut yltämään asetettuihin tavoitteisiin.

3.5.1. Japanilainen talotehdasmalli

Japanin asunnoista jopa kolmasosa on tehdasvalmisteisia. Jo 1970-luvulta lähtien tällä toimialalla on koettu laajoja innovaatioita niin asiakasrajapinnan kuin toimitusketjun ja valmistusprosessien osalta. Tämä on mahdollistanut räätälöinnin korkean tason tehdasvalmisteisissa asunnoissa. Asiakkaat voivat tehdä valintoja laajasta valikoimasta suunnittelun, rakennusteknologian ja sisustuksen suhteen. Mikäli valikoimista ei löydy asia-

kasta miellyttäviä vaihtoehtoja, voi asiakas maksamalla enemmän valita myös ulkopuolisista valikoimista. (Barlow et al. 2003, ss. 134–138)

Japani on maanjärityksille herkällä alueella ja teollisesti valmistettujen talojen tiedetään kestävän hyvin maanjärityksiä. Huoltotoimenpiteet takaavat, että rakennukset kestävät vähintään 30 vuotta ja jotkut yritykset takaavat jopa 60 vuoden keston. Tämä voi olla osasy syy teollisesti valmistettujen talojen kysyntään. Korkea vuosittainen tuotantotaso on mahdollistanut komponenttijärjestelmiin, tuotantoteknologioihin ja asiakaspalveluihin investoinnin, mikä kuvaa japanilaisen teollisen rakentamisen vahvuutta ja ainutlaatuisuutta tänä päivänä. (Linner & Bock 2012, s. 157)

Yksi japanilaisista talovalmistajilta on Toyota, jolla on Japanissa talotuotantoa Toyota Housing Corporation (THC, ent. Toyota Homes) konseptin muodossa. THC tuottaa tehdasvalmisteisia omakotitaloja ja on markkinoiden kansainvälinen robotiikan ratkaisujen soveltamisen johtaja. Yrityksen tuottamien talojen hintataso on keskiluokkaa japanilaisilla markkinoilla. Taloja on saatavilla montaa eri laatutasoa eli talot ovat räätälöitävissä asiakkaan toiveiden mukaan. (Schuster) Räätälöinti perustuu siihen, että valittavissa on erilaisia vakioituja esikokoonpantuja modulaarisia yksiköitä, jotka kuljetetaan ja varustetaan työmaalle kokoonpanoa varten (Barlow et al. 2003, s. 142).

THC on ottanut käyttöön tuotannossaan osan autotehtaasta tutuista lean-periaatteista. Tärkeimmät näistä ovat JIT (Just In Time), Jidoka, Heijunka, vakioitu työ ja Kaizen. (Smith & Hulsberg 2008) JIT:n liittyvät menetelmät on käsitelty lyhyesti luvussa 3.3.

Jidokalla tarkoitetaan tuotannon automatisointia yhdistettynä ihmisälyyn. Toyotan periaatteen mukaan toiminta automatisoidaan vasta sitten kun käsityöllä ei tuoda mitään lisäarvoa työvaiheeseen. Lisäksi koneella ei tulisi koskaan korvata työntekijää, vaan koneen ja työntekijän yhdistämisellä pyritään kohti tarkempaa laatua. Oleellinen osa Jidokaa on myös se, että koneet voidaan pysäyttää yhtä helposti kuin laittaa käyntiinkin. (Smith & Hulsberg 2008)

Heijunka on keino, jolla THC pitää varastotasot matalina ja tavaransyötön jatkuvana. Tämä mahdollistetaan sillä, että tuotanto aloitetaan suoraan asiakkaan tilauksesta. Koska tuotteiden työvaiheet ja materiaalit on vakioitu, voidaan tuotantoon toimittaa tietyt materiaalit heti asiakkaan valintojen jälkeen. (Smith & Hulsberg 2008)

Vaikka Toyotan taloja voidaan räätälöidä asiakkaiden tilausten mukaan, on työvaiheet ja materiaalit vakioitu niin, että tietyistä osista voidaan koota erilaisia taloja. Erikokoiset ja -malliset talot voidaan koota erilaisista moduuleista. Kun työvaiheet ja materiaalit ovat vakioituja, ei tuotannon tarvitse olla kovinkaan joustavaa ja asetussajat jäävät lyhyiksi. Vakioitu tuotantoprosessi myös lyhentää tuotteen läpäisyaikaa. (Smith & Hulsberg 2008)

Kaizenilla viitataan ihmisen rooliin lean-tuotannossa. Periaatteena on, että työntekijät toimivat tiimeissä ja pyrkivät joka päivä löytämään pieniä parannusehdotuksia työympäristöönsä. Kaizen-periaatteen mukaan jatkuvilla pienillä kehitysaskelilla saavutetaan parempi tuloksia kuin isoilla ”kaikki-kerralla-kuntoon” -ratkaisuilla. (Smith & Hulsberg 2008)

THC:n tuotantoprosessi perustuu siihen, että taloa varten tehdään tietty määrä moduuleita, jotka voidaan asettaa työmaalla paikoilleen haluttuun muotoon. Moduulit kootaan tehtaalla niin, että kantavana rakenteena toimii metallikehikko, johon liitetään seinät. Seiniin on jo aiemmin asennettu ikkunat sekä talotekniikkaa varten tarvittavat johdot. Tämän jälkeen tehtaalla asennetaan paikoilleen kiinteät kalusteet. Työmaalla moduulit kootaan tiettyyn järjestykseen, jolloin syntyy asiakkaan toiveiden mukaan räätälöity talo. (Schuster)

Sekisui Heim on perustettu 1972 ja on yksi maailman suurimmista tehdastalovalmistajista. Sen tuotteet on kohdistettu hintaluokassaan keskitasosta ylöspäin ja yrityksen tavoitteena on jatkossa keskittyä yhä enemmän korkean hintatason tuotteisiin. Sekisui Heimin talojen valmistusvaiheista n. 80 % tapahtuu tehtaissa. Talot kootaan useista standardimoduuleista, joita on neljä erilaista kahdessa eri koossa. Näitä kahdeksaa moduulia voidaan yhdistää vapaasti ja jakaa myös pienemmiksi huoneiksi. Moduulit koostuvat metallirakennekehyksestä ja tuotannossa käytetään esivalmisteita, jotka asennetaan moduulien sisään. Asiakkaan tuotteen räätälöintimahdollisuus perustuu siis modulaaristen osien, jotka on kokoonpantu standardiosista ja -komponenteista, kokoonpanoon. (Barlow et al. 2003, ss. 139–140)

Moduulit tuotetaan Sekisei Heimin tehtaissa virtaavassa linjaprosessissa, jossa toimittajat syöttävät materiaalit linjalle. Suurimmassa tehtaassa on kuusi tuotantolinjaa, joilla jokaisella valmistetaan tiettyä perusmallia. Linjat ovat U-mallisia, ja niiden varrella on oma syöttökohtansa jokaiselle komponentille ja osakokoonpanolle. Komponentit ja osakokoonpanot on räätälöity asiakkaan valintojen mukaan. Jokaisella prosessilla on oma laadunvarmistuksensa, ja lopputarkastus tehdään linjan lopussa ennen pakkausta. Tuotteen valmistus alkaa, kun asiakkaan toiveet on määritelty ja talo suunniteltu. Tämä on vuorovaikutteinen prosessi, joka voi sisältää useita asiakastapaamisia. Kun piirustus suunnitelmat on sidottu komponenttietoihin ja sisustusvaatimukset toimitetaan saatavuustarkistukseen. Tämän jälkeen voidaan sopia valmistumisen tavoiteaika, sekä luoda CAD-kuvat ja tuoterakenne. Tämän jälkeen tehdään tuotantosuunnitelma. Suunnittelu voi kestää muutamasta päivästä kuukausiin, asiakkaasta riippuen. Yleensä sopimuksen kirjoituksesta asennettuun taloon kuluu noin 60–90 päivää. Toimittajien toimitusajat ovat tyypillisesti 2–3 viikkoa. (Barlow et al. 2003, ss. 140–141) Sekisui Heim:n toimitusketjunhallinta perustuu JIT -virtauksen tuotantolinjalle mahdollistaviin automatisoituun materiaalien ja komponenttien valintaan sekä automatisoituun työtehtävien ja tuotannon aikataulutukseen (Linner & Bock 2012, s. 166).

Sekä Sekisuin että Toyotan tehdasjärjestelyt perustuvat kokoonpanolinjatuotantoon, jossa liikkuvat metallirakenteet räätälöidään asiakkaan valintojen mukaan. Osakokoonpanot valmistetaan rinnakkaisissa prosesseissa. Tuotantojärjestelmien ydinkohtia ovat automatisoitu teräsrakennevalmistus, virtaava kokoonpanolinja, jonka molemmiin puolin voidaan toimittaa materiaaleja työasemille, huonekalujen ja kaapeleiden esiasennus, jätteen tehdas ja laatusuuntautunut tuotanto. Lisäksi koko tuotteen elinkaari ja asiakassuhde (luovutus, laatusertifikaatit ja takuu sekä säännölliset tarkastukset ja pitkäaikainen huolto) ovat oleellinen osa japanilaista teollista rakentamista. (Linner & Bock 2012, ss. 167–171)

3.5.2. NCC Komplett

NCC julkisti uuden Komplett -talokonseptinsa keväällä 2006. Yritys esitti, että uuden tekniikan avulla kerrostalon rakennusaika saadaan puolitettua, kustannuksia pienennettyä ja laatua parannettua. 300 miljoonan euron arvoisella investoinnilla ja Japanista lainatuilla opeilla pyrittiin luomaan täysin uudenlainen ja tehokas tapa rakentaa yksilöllisiä kohteita tuhannen asunnon vuositaitia. (NCC 2006)

Hallstahammariin, Ruotsiin, perustetussa tehtaassa työskenteli noin 80 työntekijää ja sen automaatioaste oli korkea. Tehdas noudatti lean-periaatteita ja toimi imuohjautuvasti sekä toimitusketju ja modulaarisuus olivat pitkälle kehitettyä. Lisäksi mainostettiin tehtaan puhtautta ja sitä, että valmiista talosta 90 % valmistetaan tehtaassa. (NCC Komplett – A technological Leap for Lean House Production 2007)

NCC:n rakennuskonsepti perustui niin sanottuun työmaaintensiiviseen osasettiin. Kaikki rakennukseen tarvittavat osat kuljetettiin työmaalle litteinä eli asuntojen runkoja ei kokoonpantu vielä tehtaalla. Tehtaalla valmistettiin seinä-, katto- ja lattiaelementit kaikkine varusteluineen, jonka jälkeen valmiit elementit kuljetettiin työmaalle ja koottiin siellä. Työmaalle tehtiin mobiilitehdas, joka koostui rungosta, suojista ja nostimista tulevan rakennuksen ympärille. Rekat ajettiin sisälle työmaalla sijaitsevaan tehtaaseen ja siellä osat nostettiin, kiinnitettiin ja asennettiin paikoilleen. Näin työmaalla nousi nopeasti uusi rakennus. (NCC Komplett – A technological Leap for Lean House Production 2007)

Rakennuselementtitehtaalla tuotanto alkoi seinäbetonielementtien teolla rakennuskohdistaisten piirustusten mukaisesti. Tämän jälkeen seinäelementteihin asennettiin ikkunat, ovet ja lämpöpatterit. Tämän jälkeen seinät maalattiin tai tapetoitiin ja niihin asennettiin sähkörsiat ja katkaisijat. Samaan aikaan ikkunoiden asentamisen kanssa alkoi myös lattioiden, kattojen ja keittiön teko. Lattioihin asennettiin parketti tai muu vastaava materiaali sekä kattoihin pinnoitteet. Keittiöön taas asennettiin kaikki tarvittava kalusto ja myös kaakelointi kaappitilojen väliin. Nämä työvaiheet suoritettiin rinnakkain ja lastaus rekkoihin tapahtui ilman välivarastointia. (NCC Komplett – A technological Leap for Lean House Production 2007)

NCC Komplet -kehitysprojekti päätettiin lopettaa vuoden 2008 kevään loppuun, sillä konseptilla ei ollut saavutettu kustannussäästöjä, joihin pyrittiin. Kahdessa vuodessa rakennuksia ehdittiin tehdä uudella teknologialla 16 kappaletta, joissa oli yhteensä noin 300 asuntoa. (NCC 2007)

3.6. Tutkimus teollisen rakentamisen kokemuksista

Teolliseen rakentamiseen liittyvistä toteutetuista hankkeista ja niiden onnistumisten tai epäonnistumisten syistä on tehty jo jonkin verran tutkimusta. Nämä toimivat tärkeänä lähtökohtana suunniteltaessa ja toteutettaessa uusia teollisen rakentamisen hankkeita ja niitä on esitelty tässä luvussa. Teollisessa rakentamisessa voidaan hyötyä myös perinteisen rakentamisen ongelmakohtiin pureutuvista tutkimuksista, sillä teollisen rakentamisen keinoilla on tarkoitus nimenomaan välttää perinteisen rakentamisen sisältämät ongelmat. Taulukkoon 2 on koottu tässä luvussa tarkasteltujen tutkimusten pääpainot.

Taulukko 2. Teollisen rakentamisen tutkimuksen painotus.

Tutkimuksen pääpaino	
Tuotannonohjaus	Henrich & Koskela 2005
Sovellettavat toimintamallit	Simonsson & Emborg 2009; Smith 2010; Gerth 2008; Gibb 2001; Koskela 2003; Linner & Bock 2012; Höök & Stehn 2008
Laatu projekteissa	Johnsson & Meiling 2009
Teollisen rakentamisen yleistymisen	Johnsson & Meiling 2009; Sorri et al. 2013; Smith 2010; Koskela 2003; Pan & Goodier; Linner & Bock 2012
Asiakkaan rooli	Barlow et al. 2003; Pan et al. 2012; Linner & Bock 2012

Henrich & Koskela (2005, s. 2) esittelevät konferenssijulkaisussaan tutkimustaan siitä, miksi tuotannonohjaus usein epäonnistuu rakennusprojekteissa. He havaitsivat, että rakennustuotannossa esiintyy paljon odotusaikoja, riittämättömiä työvälineitä, liikaa työvoimaa, kahteen kertaan tehtyä työtä, turhaa liikkumista, ei teollisia prosesseja, riittämättömää materiaalienhallintaa ja keskeytyvää työtehtävien suorittamista. Nämä hukat tuotannossa taas johtuvat työntöohjautuvasta tuotannosta, jaetusta suunnitteluvastuusta, monimutkaisuudesta, urakoitsijoiden käytöstä johtuvasta jatkuvan kehittymisen hidastumisesta, joidenkin sidosryhmien sitoutumattomuudesta, hankintaosaston ja tuotannon yhteistyön puutteesta sekä tietotekniikan puutteesta. (Henrich & Koskela 2005, s. 2)

Simonsson & Emborg (2009, s. 5) ovat tehneet tutkimusta rakennusteollisuuden uusien teknologioiden ja lean-periaatteiden soveltamisesta rakennusteollisuuteen tehokkuuden ja tuotantomenetelmien parantamiseksi. He toteavat, että perinteisesti rakennusteolli-

suuden ongelmia ovat, että päätöksenteko perustuu usein lyhyeen aikajänteeseen ja toisaalta jokainen projekti nähdään yksittäisenä projektina, jolloin uusien materiaalien tai tuotantoratkaisujen käyttöönoton mielekkyys laskee. Tämä taas hidastaa rakennusteollisuuden kehitystä. Kuitenkin ottamalla käyttöön rakennusteollisuudelle uusia toimintatapoja, pystytään perinteisten rakennushankkeiden tehokkuutta parantamaan. (Simonsson & Emborg 2009, ss. 5–19)

Pan et al. (2012) tutkivat artikkelissaan rakennusjärjestelmän valintaan vaikuttavia tekijöitä. He laativat päätöksenteon tueksi arvostelukriteerit vertaamaan perinteistä ja teollista rakentamista. Kriteerit ryhmiteltiin kahdeksan ominaisuuden mukaan joita ovat kustannukset, aika, laatu, terveys ja turvallisuus, kestävyys, prosessi, toimitus sekä regulatiivinen ja lakisääteinen hyväksyntä. Vaikka monipuolisemmat arviointimenetelmät ovat yleistyneet, olivat kustannukset heidän tutkimuksessaan kuitenkin edelleen tärkein kriteeri rakennusjärjestelmän valinnassa. Aikaa, prosessia, laatua ja toimitusta tulkittiin joko suorasti tai epäsuorasti taloudellisessa mielessä. Kestävyyttä, terveyttä ja turvallisuutta sekä regulatiivista ja lakisääteistä hyväksyntää pidettiin tärkeinä ja välttämättöminä. Tämän takia nämä eivät juuri vaikuttaneet eri vaihtoehtojen keskinäiseen arviointiin. (Pan et al. 2012, s. 1248)

Johnsson & Meiling (2009, ss. 679–674) toivat tutkimuksessaan esiin, että moduuleille työmailla suoritetuissa lopullisissa tarkastuksissa 55 % epäkohdista aiheutui osista, joita ei ollut toimitettu moduulin mukana sopimuksen mukaisesti. Toimittamattomien osien lukumäärä oli isompi kuin verratuissa kuudessa perinteisessä rakennusprojektissa. Tästä muodostui siis yksi potentiaalinen kehittämiskohde tarkastelluille yrityksille. Toimitusketjua hallinnoidaan sopimuksien kautta, mutta suhteet toimittajiin eivät olleet kehittyneet vastaamaan linjabalansoitua aikakriittistä tuotantoa, jota moduulituotanto edustaa. Tutkimuksessa nousi myös esiin, että tuotantokulttuuri perustui edelleen perinteiseen työmaarakentamisen kulttuuriin. Tämä aiheutti työntekijöiden heikkoa motivaatiota, jatkuvan parantamisen puuttumista, ongelmien selvittämistä, mutta analysoimatta jättämistä ja materiaalien huoltoon liittyvää vastuuttomuutta. (Johnsson & Meiling 2009, ss. 673–674)

Johnsson & Meiling (2009, s. 679) toteavat artikkelissaan, että moduulirakentamisen kehitystä hidastaa muun muassa se, että moduuleihin tehtäviä tarkastuksia ei hyödynnetä tarkempaan ja pidemmän tähtäimen analysointiin. Syyksi tähän he epäilevät analysoinnin vaatimuksien puutetta asiakkailta ja viranomaisilta. Lisäksi syyksi voidaan epäillä perinteisestä rakentamisesta peräisin olevia kulttuurisia syitä, jotka vaikuttavat teollisen rakentamisen organisaatiokulttuureihin aiheuttaen standardoinnin, työntekijöiden strategiauskollisuuden ja ylemmän johdon tuen ja strategioiden puutetta. Epäkohtien ja poikkeamien tunnistaminen voisi tukea prosessi- ja tuotekehitystä pitkällä tähtäimellä, sekä asiakkaiden että yrityksen tarpeet huomioiden. Artikkelissa korostetaan myös, että teollisen rakentamisen mahdollisia hyötyjä ei tavoiteta, jos keskitytään vain

ulkoiseen asiakasarvoon tukahduttaen sisäinen tuotannon tehokkuus ja unohtaen sisäiset asiakkaat. (Johnsson & Meiling 2009, s. 679)

Höök & Stehn (2008, s.1098) tutkivat teollista rakentamista Ruotsissa ja myös he toteivat, että perinteisen rakentamisen projektilähtökohtainen kulttuuri vallitsee yhä myös teollisen rakentamisen yrityksissä. Tämä näkyy heidän mukaansa heikkona motivaationa ja tietoisuutena luonnollista laatua, jatkuvaa parantamista ja virtausta kohtaan. Se näkyy myös ongelmien ratkaisemisena, mutta analysoimatta jättämisenä sekä työvälineiden ja -tilojen huollon tilapäisratkaisujen muodossa. Kuitenkin esimerkiksi perinteisestä rakentamisesta tuttu tiimityöskentely ja tiimien suuri vastuu ovat positiivisia piirteitä ja osa myös prosessisuuntautunutta ajattelumallia. Näiden jo olemassa olevien luonnollisten tuotantokulttuurien tiedostaminen on tärkeää kun kehitetään teollista tuotantoa. (Höök & Stehn 2008, s. 1098)

Sorri et al. (2013, s. 1) ovat tehneet tutkimusta kennomoduulien rakentamisen kaupallistamisesta ja sen edellyttämästä tutkimuksesta. He toteavat, että kennorakenteiden ollessa melko uusi ratkaisu, tulee tehdä paljon tutkimustyötä ennen kuin ratkaisulla on suurempi merkitys kaupallisilla markkinoilla. Tutkimusta tulee tehdä muun muassa rakennesuunnittelun, rakennusmekaniikan, arkkitehtuurin, elinkaarikustannusten ja rakennusprosessin osa-alueilla. (Sorri et al. 2013, s. 1)

Tutkimustensa perusteella Sorri et al. (2013, s. 3) toteavat, että modulaarisen ja teollisen rakentamisen kokeilujen menestys on vaihdellut huomattavasti. Erikoistarkoituksia varten rakennetut ja uudenlaiseen liiketoimintamalliin perustuvat ratkaisut ovat todistaneet pystyvänsä olemaan elinkelpoisia. Toisaalta taas usein yhdistettäessä perinteisiä toimintatapoja, niiden odotuksia ja perinteitä, uudenlaiseen modulaariseen rakentamiseen, on päädytty pettymykseen. Vaikuttaisi siis siltä, että modulaarisen rakentamisen ratkaisut tulisi toteuttaa ilman perinteisen rakentamisen ratkaisujen painolastia. Yleisesti koko prosessin odotusten ja tavoitteiden tulisi olla enemmän perinteisen teollisuuden kaltaisia. (Sorri et al. 2013, s. 3)

Sorri et al. (2013, s. 8) havaitsivat tutkimuksissaan, että paikkakokoonpanoon perustuva toiminta moduulitehtaassa johti siihen, että moduulien virtaava asennus työmaalla ei aina onnistunut. Tämä taas johti alempaan tuottavuuteen ja projektin keston pidentymiseen. He myös korostavat suunnittelun ja tuotannon yhteistyön merkitystä, yksityiskohdaisempaa tuote- ja tuotantotietoa jo projektien aikaisessa vaiheessa, toleranssien hallintaa sekä mahdollisten valmistusvirheiden ennaltaehkäisyä. Tutkimuksissa todettiin myös, että saatavilla olevien osaavien ja sitoutuvien kumppanien löytäminen voi alan uutuuden takia olla modulaarisessa rakennusprojektissa vaikeaa. (Sorri et al. 2013, ss. 8–10)

Smith (2010, ss. 163–164) esittelee kirjassaan tekemäänsä tutkimusta modulaarisen rakentamisen projekteista. Hän toteaa, että useat modulaarisia asuintaloja tekevät yritykset

käyttävät samanlaista urakoitsijoiden käyttöön perustuvaa yhteistyörakennetta kuin perinteisessä rakentamisessa. Erona on vain se, että aliurakoitsijat tuodaan tehtaaseen tekemään työtään. Tutkimuksissa selvisi myös, että modulaarisessa rakentamisessa yleistä on, että työmaalle siirtyy työvaiheita, jotka alun perin piti suorittaa tehtaalla. Tätä tulisi aktiivisesti ehkäistä sillä muuten valmistuksen painopiste alkaa huomaamatta siirtyä takaisin työmaan puolelle, heikentäen tehokkuutta. (Smith 2010, ss. 163–164)

Smith (2010, s. 167) käsitteli tutkimuksissaan modulaarisen rakentamisen alalla toimivia yrityksiä, jotka ovat onnistuneet luomaan toimivan tuotantomallin. Modulaarisen rakentamisen yritykset voidaan jakaa kahteen ryhmään: yrityksiin, jotka tekevät perinteistä rakentamista sisätiloissa ja yrityksiin, jotka toteuttavat rakentamisen teollisena valmistusprosessina hyödyntäen esimerkiksi lean-tuotannon keinoja. Viemällä perinteinen rakentaminen sisätiloihin voidaan lisätä työskentelypäiviä, parantaa laadunohjausta ja lyhentää projektien kestoa. Kuitenkin yhden kappaleen virtaa käyttämällä tuotantoprosessia voidaan myös tehostaa huomattavasti. Sujuvan ja ennustettavan tuotantoprosessin perustana on myös tuoterakenteiden tarkka dokumentointi ja työkaluna käyttäminen. (Smith 2010, s. 167)

Myös Gerth (2008, s. iii) päätyi tutkimuksessaan siihen, että teollinen rakentaminen on erilaista kuin perinteinen rakentaminen ja muistuttaa oikeastaan enemmän teollista valmistusta. Teollisessa rakentamisessa toiminnan tulisi olla prosessorientoitunut jatkuvan tuotantoprosessin ympärille. Tämä tarkoittaa, että yhtä rakennuskohdetta tai projektia ei käsitellä ainutlaatuisena, vaan se valmistetaan käyttämällä samaa tuotantoprosessia ja samoja resursseja kuin edelliset ja tulevatkin tilaukset. (Gerth 2008, s. iii)

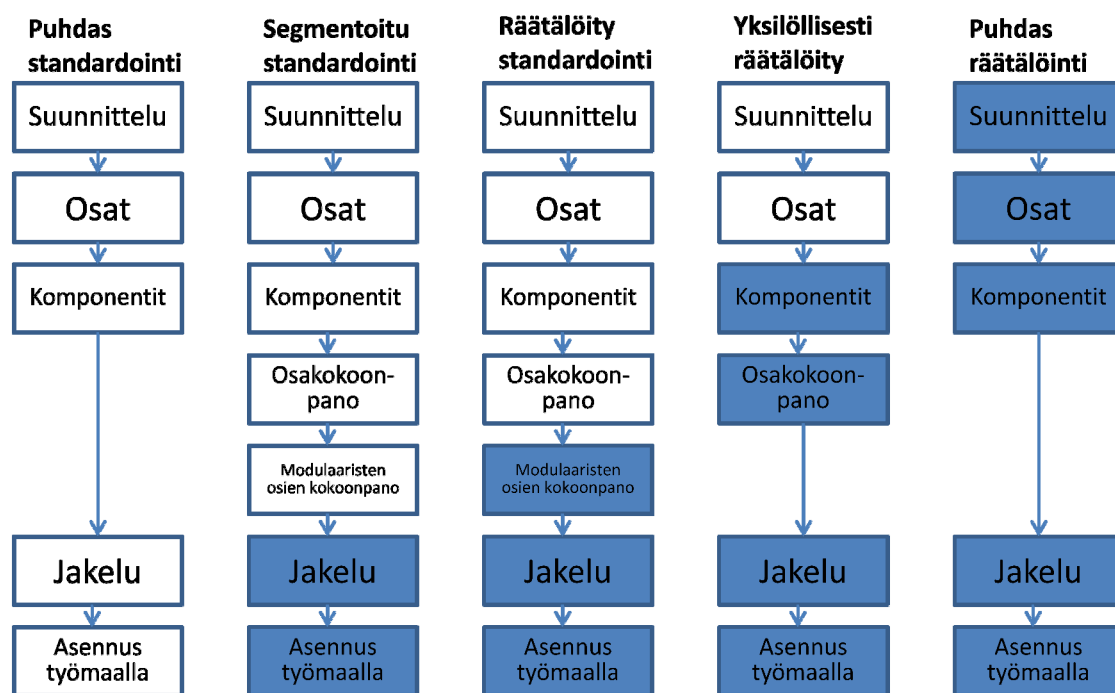
Gibb (2001, s.315) on päätenyt siihen, että standardointi ja esivalmistus voivat parantaa kustannustehokkuutta ja tehostaa rakentamista, mikäli ne optimoidaan ja hallitaan tehokkaasti. Ne voivat myös kasvattaa tuottavuutta. Hyötyjä ei kuitenkaan saavuteta automaattisesti, vaan ne vaativat kaikilta projektiin osallistuvilta yhteisymmärrystä ja sitoutumista. Projektijohdon tulee vastata muuttuvaan kulttuuriin, kun perinteiden rakentamisen toiminnot korvataan teollisen valmistuksen keinoilla. Mikäli tässä ei onnistuta, vaarantuu muutoksen aiheuttamien hyötyjen saavuttaminen. (Gibb 2001, s. 315)

Koskela (2003, s. 85) onkin tarkastellut kriittisesti rakentamisen kehittämisen keinoja ja syitä muutosten positiivisten tulosten puuttumiselle. Hän toteaa, että yhteistä suurimmalle osalle rakentamisen kehittämisen hankkeita on, että ne vaativat jonkinlaisia rakenteellisia muutoksia organisaatiossa tai tiedon ja materiaalien virrassa. Rakentamisen teollistamisen määrä on kasvanut, mutta se ei ole tehnyt vielä läpimurtoa rakennusalalla. Teollistamisen menestyksen hidastajana on toiminut se, ettei tuotantoa ole lähtökohtaisesti tarkasteltu virtaus- ja arvönäkökulmasta. Ei riitä, että rakennustuotanto vain vaihdetaan valmistusprosessiksi. Teollisella rakentamisella on myös hyvin erilaisia ominaispiirteitä kuin perinteisellä rakentamisella. Teollisessa rakentamisessa virtaus on pidempi vaiheiden määrän ja etäisyyksien mukaan, suunnitelmien määrän tarve on suurempi,

virheen korjaamisaika on pidempi ja ulottuvuuksien tarkkuus tulee olla suurempi. Näiden myötä teollisesta rakentamisesta on tulossa yhä monimutkaisempaa ja häiriöherkempää. Siksi on luonnollista, että huonosti kontrolloidut toiminnot kumoavat teollistamisen mahdolliset edut. Myös rakentamisen perinteisten ominaispiirteiden aiheuttamien ongelmien poistaminen johtaa usein uusiin ongelmiin, jotka tulisi poistaa. Perinteisen tuotannon kehittäminen toteutetaan usein niin, että siirrytään tehdastiloihin, jolla poistetaan työmaatyöskentelyn haitat. Tämä kuitenkin saattaa tuotannon samaan lähtöpisteesseen, missä teollinen tuotanto aikoinaan oli. Tuotannon siirtäminen tehdastiloihin ei yksinään riitä, vaan tulisi pyrkiä myös kehittämään virtaus- ja arvoajattelua tuotannossa. Yleisesti todetaan, että rakentamisen uudistaminen perustuu usein vain tuotantojärjestelmän kehittämiseen, mutta sen kuitenkin tulisi huomioida kaikki tasot: suunnittelu, toiminnot ja tuotantojärjestelmän kehittäminen. Rakenteelliset muutokset ovat vain osa kehitystä ja niiden lisäksi tulisi huomioida myös operatiivisen tason ratkaisujen kehittäminen. (Koskela 2003, ss. 85–96)

Pan & Goodier (2012, s. 91) ovat tutkineet teollisen rakentamisen hankkeita Iso-Britanniassa. He ovat todenneet, että monet talonrakentajat muokkaavat liiketoimintaansa ja/tai kehittävät uusia liiketoimintamalleja mahdollistaakseen teollisten talonrakentamisteknologioiden käyttöönoton. Näiden liiketoimintamallien kehityskaari paljastaa talonrakentajien strategian ytimen, joka on keskittymisen ydintoimintaan, kuten arvon luomiseen kehityksellä, sen sijaan että ne keskittyisivät valmistukseen ja toimitukseen tai rakennusteknologian innovaatioihin itseensä. Tämän perusteella voidaankin havaita, että haasteena on monitahoinen suhde talonrakennuksen liiketoimintamallien ja teollisen rakentamisen teknologioiden vastaanottamisen välillä. Näiden kahden linkittämisessä voidaan korostaa liiketoimintaprosessien, riskien ja rahoituksen tekijöitä. (Pan & Goodier 2012, s. 91)

Barlow et al. (2003, s. 135) toteavat, että historiallisesti standardoinnissa ja esikokoonpanossa ajavana voimana on ollut pyrkimys saavuttaa mittakaavaetuja tuotannossa. Nykyään kuitenkin pyritään yhä enemmän saavuttamaan rinnakkaistuotannon etuja kehittämällä prosesseja niin, että samoilla työvälineillä ja materiaaleilla voidaan tuottaa erilaisia tuotteita. He tutkivat Japanin tehdastalomalleja, niissä käytettävää massaräätälöintiä ja sen mahdollistavia toimitusketjumalleja, joilla on saavutettu korkea räätälöinnin taso toimitetuissa tuotteissa. Tutkimuksessa kohteena olivat yritykset, jotka toimittavat standardoiduista komponenteista tai modulaarisista järjestelmistä kokoonpantuja räätälöityjä taloja. Tutkimuksen tarkoituksena oli todistaa, että massaräätälöintiin voidaan soveltaa useampia eri toimitusketjumalleja. Tämä on tärkeää erityisesti talonrakennusteollisuudelle, koska tarvitaan erilaisia ratkaisuja tuotteiden toimitusta varten laajojen asiakasvaatimusten ja markkinasegmenttien takia. Tutkimuksen perusteella rakennusteollisuudelle määritellyt toimitusketjustrategiat on määritetty kuvassa 5. (Barlow et al. 2003, ss. 134–142)



Kuva 5. Toimitusketjustrategiat teollisessa rakentamisessa (mukailtu Barlow et al. 2003, s. 142).

Kuvan 5 tummat alueet esittävät toimitusketjun osia, joihin vaikuttavat tietyn asiakkaan vaatimukset. Ilman väritystä olevat osat taas ovat niitä, joihin asiakas ei pysty vaikuttamaan. Toimitusketjumallin valinnassa tärkeää on muistaa, että räätälöinnin tason ja läpäisyajan keston sekä kustannusten välillä on käänteinen suhde. Toimitusketjustrategian valinta on tärkeä osa massaräätälöinnin toimivuutta, kun yritetään tyydyttää laajat asiakastarpeet. Kuitenkin tulee muistaa, että massaräätälöinti ei yksinään tarjoa ratkaisua talonrakennustuotannon ongelmiin. Ensinnäkin täytyy hoitaa perusasiat kuten laatu ja toimitusaika kuntoon ennen kuin lähdetään laajentamaan räätälöintivalintoja. (Barlow 2003, ss. 141–143)

Myös Linner & Bock (2012, s. 175–176) toteavat vuosikymmentä myöhemmin, että japanilainen teollinen rakennustuotanto on ainoa, joka toimii tuotantovolyyymillä mitattuna suuressa mittakaavassa ja käyttää virtaavaa linjamaista tuotantoa ja automaatiota. Artikkelissaan he kokoavat tutkimustaan, jossa pyrkivät selvittämään mikä on ollut Japanin teollisen rakentamisen kehityksen takana ja mihin suuntaan ala kehittyy tulevaisuudessa. Aikaisempi kirjallisuus ei ole tarjonnut vastausta kysymykseen, joten tutkimus toteutettiin empiirisellä tasolla. Tutkimuksissa kävi ilmi, että japanilaiset ovat ymmärtäneet myynnin jälkeisten palveluiden tärkeyden jo 1970-luvulta lähtien. Nykyään pyritään muuttamaan keskittyminen tuotteiden toimittamisesta palveluiden tuottamiseen, liittyen rakennusten hyödyntämisvaiheeseen, yritysten asiakassuhteiden parantamiseen sekä asiakkaiden sisällyttämisen mahdollistamiseen. Huomioitavaa on, että tämä on mahdollistunut teollistumisen myötä, kun esimerkiksi modulaarisuus mahdollistaa uudelleenjärjestelyn. Asiakkaiden vaatimukset eivät pysy samana vaan muuttuvat, ja

näiden vaatimusten ennakointi on tärkeää. Japanilaiset yritykset pyrkivät ylläpitämään asiakassuhteita ja näin vastaamaan muuttuviin tarpeisiin. (Linner & Bock 2012, ss. 175–176) Tulevaisuudessa teollinen rakentaminen Japanissa tulee suosimaan elinkaariajattelua ja keskittymään kehittyneiden tuote-palvelujärjestelmien luomiseen (Linner & Bock 2012, s. 173).

Linner & Bock (2012, s. 175) kokoavat artikkelissaan osa-alueita, joita ison mittakaavan tuotantoon tähtäävien yritysten tulisi harkita ja integroida toimintaansa. Näitä ovat sosio-tekhnologinen kulttuuri; asiakkaan mukaan ottaminen koko prosessiin; modulaarisen rakenteen vaikutus asiakkaan valintaan, tuotantoon ja palveluun; uusimmat tuotantoteknologia- ja toimitusketjun hallintakonseptit; digitaalinen ketju kaikille partnereille ja vaiheille; elinkaareen, kotitalouteen ja terveyteen liittyvät palvelut sekä rakennusten varustaminen mahdollisimman laajasti mikrojärjestelmätekhnologialla palveluiden tukemiseksi. (Linner & Bock 2012, s. 175)

3.7. Tutkimuksessa käytettävät painotusalueet ja kriteerit

Teollinen rakentaminen ei ole täysin tuore toimiala. Kuitenkin sen yleistymisen on ollut hidasta. Tämä näkyy myös siitä tehdyssä tutkimuksessa, joka on pääosin melko tuoretta. Vaikka teollista rakentamista on tutkittu paljon, on se usein melko laaja-alaista ja keskittyy usein rakenteellisiin ja organisaatiotason seikkoihin. Esimerkiksi tehdasmoduulituotannosta ja sen toteuttamisesta löytyy hyvin vähän tutkimusta. Teollisen rakentamisen toimialalta puuttuu vielä yleisesti vakioituneet toimintamallit, ja kirjallisuudesta käy ilmi tutkijoiden näkemyserot siitä, miten toimiala voisi kehittyä.

Tässä tutkimuksessa kohteena oleva rakennusmoduuli on esivalmistusasteeltaan luvussa 3.2.4. esitettyjen tasojen mukaan esivalmistettu valmis huonemoduuli. Tämä on riippumaton moduuli, jonka osakokoonpanojen tulee olla sitä varten suunnitellut. Barlow et al. (2003) mallin mukaan NEAPON moduulituotantoprosessi on toimitusketjustrategialtaan puhdasta räätälöintiä.

Luvussa 3.4.2 on esitelty tutkijoiden näkemyksiä siitä, mitä tulisi huomioida rakennusmoduulitehdasta suunniteltaessa. Näkemykset sisältävät keskenään samankaltaisia piirteitä, mutta toisaalta myös eroavat painotuksiltaan. Monet tutkijat ottavat kantaa tuotantotekhnologioiden hyödyntämiseen. Esimerkiksi Gann (1996) esittää, että autoteollisuudesta voitaisiin ottaa käyttöön tuotantotekhnologisia ratkaisuja. Myös luvussa 3.5.1. esitellyissä Japanin talotehtaissa tuotantotekhnologioita hyödynnetään paljon. Toisaalta Ballard et al. (2001) painottavat tuotantoprosessia ja Richardiin (2005) luvussa 3.2.5. esitetty uusimistuotannon hyödyntämismalli painottaa tuotteen funktion ja prosessien yksinkertaistamisen tärkeyttä tuotantotekhnologian implementoinnin sijaan. Kazi et al. (2001), Arif et al. (2012) ja Mullens (2011) toteavat, että tuotantotekhnologioilla voidaan lisätä tuottavuutta, mutta he korostavat prosessien ja ihmisten tärkeyttä moduulitehtaan suunnittelussa. Yhteistä näille kaikille on kuitenkin se, että vaikka tuotantotekhnologian tär-

keyttä painotetaan eri tavalla, nähdään se kuitenkin aina itse tuotantoprosessin tukitoimintona. Voidaankin tehdä johtopäätös, että jotta tuotantoteknologioista voidaan hyötyä, tulee tuotantoprosessin olla ensin kunnossa. Tämä tarkoittaa käytännössä keskittymistä ensin tuotannon prosessien kehittämiseen ja yksinkertaistamiseen sekä sitä kautta tuottavuuden parantamiseen, jonka jälkeen voidaan lisätä tuottavuutta hakea tuotantoteknologioiden hyödyntämisellä. Tätä ajatusmallia sovelletaan myös tässä diplomityössä.

Tuotantoprosessiin sisältyvien työvaiheiden kehittäminen on osa koko prosessin yksinkertaistamista. Roy et al. (2005) esittävät, että myös rakennusteollisuudessa dokumentointi toimisi esimerkiksi työvaiheiden kehityksen tukena. Samalla dokumentoinnilla voitaisiin parantaa myös jokapäiväistä toimintaa ja työn laatua sekä nostaa standardoinnin astetta. Dokumentointi voisi olla keino myös teollisen rakentamisen yksilöriippuvuuden ja hiljaisen tiedon hallitsemiseksi. Myös lean-ajatusmalli keskittyy vahvasti toiminnan kehittämiseen jatkuvan parantamisen ja standardoinnin kautta. Luvussa 3.3. on esitetty tutkijoiden mielipiteitä lean-filosofian soveltamisesta teolliseen rakentamiseen. Esimerkiksi Mullensin (2011) mukaan lean on tärkeä osa moduulitehtaan suunnittelua, kun taas Ruotsissa tehtyjen tutkimusten perusteella todettiin, ettei teollisen tuotannon toimiala ole vielä tarpeeksi kypsä lean-menetelmien täysimääräiseen soveltamiseen. Johtopäätöksenä voidaankin todeta, että lean-menetelmien osittainen soveltaminen esimerkiksi tuotannon virtaus- ja jatkuvan parantamisen periaatteiden osalta on suositeltavaa, mutta lean-ajatusmallin implementointi tulee suorittaa harkiten ja vaiheittain, niiltä osin kun todetaan sen kykenevän parantamaan toiminnan laatua.

Muita luvussa 3.4.2 esiin tulleita teollisen rakentamisen ympäristössä huomioitavia seikkoja oli, että rakentamisessa tärkeä tiimityöskentelykulttuuri on jo olemassa. Tärkeää onkin, että pystytään tunnistamaan ominaisuudet, jotka jo tukevat teollisen rakentamisen hyötyjen saavuttamista ja pyrkii kehittämään teollista rakentamista näiden kautta. Suunnittelun ja tuotannon yhteistyön merkitystä korostettiin myös, sillä tätä kautta voidaan parantaa tuottavuutta ja nopeuttaa tuotteen läpäisyäikää. Kysynnän ollessa vielä pientä tulee tuotantoon suunnitella valmiiksi joustavuutta kapasiteetin, valmistusprosessien sekä tuote- ja tuotevariaatiomuutosten suhteen. Tuotevariaation kasvu taas asettaa vaatimuksia tasapainottamiselle, jota on käsitelty luvussa 2.

Toteutuneita moduulihankkeita ja syitä niiden onnistumiseen tai epäonnistumiseen on tutkittu, jotta voitaisiin tukea teollisen rakentamisen yleistymistä tulevaisuudessa. Näitä tutkimuksia on esitelty luvussa 3.6. Perinteisen rakentamisen rooli on tärkeä, sillä sen on todettu vaikuttavan teolliseen rakentamiseen. Henrich & Koskela (2005) totesivat, että perinteisen rakentamisen epäonnistumisen syitä ovat esimerkiksi heikko tuotannonohjaus, joka johtaa hukan syntymiseen. Myös urakoitsijamalli hidastaa kehitystä. Simonsson & Emborg (2009) tuovat esille rakennusteollisuuden projektiluonteisuuden ja sen aiheuttaman kehityksen hidastumisen. Projektisuuntautuneisuudesta kohti prosessisuuntautuneisuutta siirtymisen kannalla ovat myös Sorri et al. (2013), Smith (2010),

Gerth (2008) ja Höök & Stehn (2008). Prosessisuuntautunut näkökulma teolliseen rakentamiseen edistäisi sen kehitystä. Myös tässä tutkimuksessa pyritään prosessorientoituneeseen tarkasteluun.

Perinteisen rakentamisen kulttuuri nähdään usein taakkana teollisen tuotannon ympäristössä. Perinteisen tuotannon haitalliset vaikutukset työntekijöiden motivaatioon ja työvaiheiden kehittymiseen tuovat esiin muun muassa Johnsson & Meiling (2009), Pan & Goodier (2012) ja Sorri et al. (2013). He ovat havainneet, että useimmin teollisen rakentamisen hankkeissa onnistuvat yritykset, joilla ei ole taustaa rakennusteollisuudessa. Johtopäätöstä tukee myös se, että Japanissa teollisen rakentamisen yritykset ovat hyvin menestyksekkäitä, kun taas Euroopassa teollinen rakentaminen ei ole yleistynyt yhtäläisesti. Japanin ja Euroopan välillä voidaan havaita selkeitä eroja juurikin siinä, ettei japanilaisilla yrityksillä yleensä ole rakennustaustaa ja suhtautuvat hyvin positiivisesti teknologian kehitykseen. Euroopassa taas useiden hankkeiden takana on ollut perinteisen rakentamisen taustan ja päätulonlähteen omaava yritys.

Tämän perusteella vaikuttaisi siltä, että avoimuus uusia teknologioita ja käytäntöjä kohtaan on avaintekijä teollisen rakentamisen hankkeissa. Kun taustalla ei vaikuta perinteisen rakentamisen konservatiivinen ja korkea ammattiosaamista arvostava kulttuuri, voidaan päätöksiä tehdä vapaammin. Toisaalta kyseisissä tapauksissa taustat ovat useimmiten niin sanotun perinteisen tuotannon puolelta, mikä osaltaan tukee ajatusta teollisuuden toimintatapojen soveltamisesta teolliseen rakentamiseen. Tähän liittyen Smith (2010) korostaa, että teollisessa rakentamisessa on tärkeää erotella yritykset, jotka rakentavat sisätiloissa ja yritykset, jotka hyödyntävät tuotannossaan teollisia prosesseja. Yleisesti voidaan toisaalta pohtia myös perinteisen rakentamisen yhtiöiden johdon sitoutuneisuutta teollisen rakentamisen sivuliiketoimintaan kysynnän ja teknologian ollessa vielä epävarmaa tällä toimialalla. Mikäli perinteisen rakentaminen on tuottoisaa, ja siihen on yrityksessä luotu toimivat toimintamallit, ei riskinotto välttämättä ole kannattavaa.

Teollisen tuotannon toimintatapojen soveltamisessa teolliseen rakentamiseen on kuitenkin erittäin tärkeää toimia tapauskohtaisesti. Esimerkiksi Koskelan (2003) mukaan monissa teollisen rakentamisen hankkeissa on epäonnistuttu, koska on tehty liian nopeita ja suuria päätöksiä kerralla, jolloin toteutus ja kehittäminen ovat jääneet epätäydellisiksi. Johtopäätöksenä keskusteluun perinteisen rakentamisen ja teollisen tuotannon roolista teollisessa rakentamisessa voidaan todeta, että kummankaan toimialan toimintatapoja ei tule suoraan soveltaa teolliseen rakentamiseen. Teollisen rakentamisen tuote ja sen funktio tulevat perinteisen rakentamisen puolelta. Tärkeää on keskittyä nimenomaan tuotteen funktioon ja tarkastella kriittisesti sen toteutustapaa ja valmistusmenetelmiä. Teollisen tuotannon puolelta taas kannattanee hyödyntää tuottavuus- ja tehokkuusajattelua, jotta voidaan toteuttaa tuotannon läpikäymä teollistuminen nopeammin teolliseen rakentamistuotantoon. Tässä kuitenkin tärkeää on pitää mielessä asiakasryhmät, joiden

vaatimukset saattavat vastata vielä perinteisen rakentamisen kulttuuria ja maltillisuus suurien teknologiainvestointien teossa ennen perusasioiden kuntoon saattamista.

Kustannusten aleneminen on yksi teollisen rakentamisen eriteltyjä hyötyjä. Myös Pan et al. (2012) havaitsivat, että kustannukset ovat yhä pääkriteeri rakennuksen tilaajalle tuotantotavan valinnassa. Niinpä kustannusten alentamiseen tuotannossa tulee keskittyä. Lisäksi Johnsson & Meiling (2009) tuovat esiin, että laatuongelmia on havaittavissa uusien työmenetelmien ja -tapojen sekä moduulien liikuttamisen seurauksena. Kuten jo aiemmin on mainittu, teollisen rakentamisen onnistumisen kannalta on tärkeää, että pyritään saavuttamaan teollisen rakentamisen hyödyt, kuten kustannusten aleneminen ja laadun parantuminen. Nämä toimivatkin kriteereinä tarkastellessa teollisen rakentamisprosessin onnistuneisuutta.

Muita luvussa 3.6. esiin tulleita huomioitavia alueita ovat teollisen rakentamisen standardien kehittäminen ja tuotteiden suunnittelun sekä tuotannon yhteistyön kehittäminen. Näin voidaan kehittää tuotteiden vakiointia esimerkiksi massaräätälöinnin avulla. Tällä taas on positiivisia vaikutuksia tuotannon tasapainotuksen ja joustavuuden hallintaan. Myös toimitusketjun rooli teollisessa talotuotantoprosessi nostettiin esiin Johnsson & Meiling (2009), Sorri et al. (2013), Smith (2010) ja Höök & Stehn (2008) toimesta. Urakoitsijamallin käyttämisen todettiin hidastavan prosessien kehittämistä ja toisaalta läheisten toimittajasuhteiden kehittämisen helpottavan virtauksen luomista ja varastonhallintaa.

Teollisen rakentamisen asemaa perinteiseen rakentamiseen ja teolliseen tuotantoon käsitellään tutkimuksissa paljon. Taulukkoon 3 on koottu artikkeleista ja kirjoista piirteitä, jotka vaikuttavat teollisen rakentamisen asemaan. Siinä on huomioitu rakentamisen ominaisuuksia, jotka tulee huomioida. Kulttuurilla tarkoitetaan vallitsevaa työkulttuuria ja urakoitsijamallia. Toimitusketjulla ja räätälöinnillä viitataan, että rakentamisessa perinteisesti asiakkaalla on suuri räätälöintimahdollisuus, minkä takia myös toimitusketjulla on tärkeä rooli. Taulukossa on listattu myös ominaisuuksia, joita tulisi omaksua teollisesta tuotannosta.

Teollisen rakentamisen moduulituotannosta on olemassa hyvin vähän tutkimusta. Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, ettei muita ongelmia liittyen rakennusmoduulien kaupallistamiseen, kustannustenhallintaan ja imagoon ole vielä ratkaistu. Kysynnän kasvun myötä tuotannon tutkimus varmasti lisääntyy, koska tällöin paineet kustannustehokkaaseen, nopeaan ja joustavaan tuotantoon kasvavat entisestään. Tällä hetkellä kiireisimmät ongelmat nousevat esiin liittyen lähinnä muihin toimintoihin kuin tuotantoon. Nämä ongelmat tulee ratkaista, jotta kysyntää saadaan kasvatettua. Toisaalta on tärkeää samalla tehdä tarkempaa tutkimusta myös tuotannosta, sillä kysynnän kasvun alkaessa saattaisi tuotannon valmiuden puute johtaa jälleen teollisen rakentamisen leviämisen hidastumiseen. Myös luvussa 3.6. esitellyille tutkimuksille oli yhteistä se, että kaikki painottivat lisätutkimuksen tarvetta teollisen rakentamisen kehittämisen tueksi.

Taulukko 3. Teollisen rakentamisen asema rakentamisen ja tuotannon välimaastossa.

Teollisen rakentamisen asema	
Rakentaminen	
Kulttuurin huomioiminen	Johnsson & Meiling 2009; Pan & Goodier 2012; Sorri et al. 2013;
Toimitusketju ja räätälöinti	Johnsson & Meiling 2009; Sorri et al. 2013; Smith 2010; Höök & Stehn 2008; Mullens 2011; Barlow et al. 2003; Linner & Bock 2012
Teollinen tuotanto	
Pääosassa tuotantoteknologiat	Gann 1996
Keskitytään ydinprosesseihin, joita tuetaan tuotantoteknologioilla	ManuBuild 2001; Arif et al. 2012; Mullens 2011
Pääosassa ydinprosessit	Ballard et al. 2001; Richards 2005; Koskela 2003
Dokumentointi ja vakiointi	Roy et al. 2005; Richards 2005; Höök & Stehn 2008; Mullens 2011; Gibb 2001
Lean-menetelmien soveltaminen	Mullens 2011; Höök & Stehn 2008; ManuBuild 2009
Lean-menetelmiä harkiten	Björnfot & Stehn 2004; Gibb 2001
Suunnittelun ja tuotannon yhteistyö	Mullens 2011; ManuBuild 2009; Arif et al. 2012
Prosessisuuntautuneisuus	Sorri et al. 2013; Smith 2010; Gerth 2008; Höök & Stehn 2008; Ballard et al. 2001; Simonsson & Emborg 2009; Gerth 2008; Koskela 2003

Tässä tutkimuksessa käytettävät, teollisen rakentamisen ympäristössä huomioitavat painotusalueet ovat:

1. Keskittyminen prosessiin ja sen kehittämiseen
2. Tuotteen monimutkaisuuden huomioiminen
3. Kapasiteetin asteittaisen lisäyksen mahdollistaminen
4. Perinteisen rakentamisen kulttuurin vaikutuksen huomioiminen
5. Teollisen rakentamisen hyötyjen saavuttaminen
6. Standardien ja vakioitujen työvaiheiden kehittämisen tukeminen

Prosessiin ja sen kehittymiseen keskittymisellä viitataan pyrkimykseen luoda virtaava tuotantoprosessi, jonka kehittäminen on jatkuvaa. Tällä viitataan myös siihen, että pääpaino on itse prosessissa ja siihen liittyvissä perusasioissa. Tuotteen monimutkaisuudella tarkoitetaan rakennusmoduulin rakennetta, johon vaaditaan paljon eri materiaaleja, komponentteja ja työvaiheita. Kehitettävän tuotantokonseptin tulee huomioida tulevaisuudessa kysynnän kasvu ja tämän myötä vaadittava kapasiteetin nosto. Perinteisen ra-

kentamisen kulttuurin vaikutukset tulee huomioida tuotantokonseptia suunnitellessa, sillä niillä on vielä suuri vaikutus työntekijöihin ja -menetelmiin. Siksi tuotantokonseptin tulee tukea tämän kulttuurin epätoivottujen vaikutusten vähentämistä. Lisäksi on tärkeää huomioida rakentamisen kulttuurin vaikutus työntekijöiden asenteisiin ja uusien toimintamenetelmien käyttöönoton halukkuuteen. Teollisen rakentamisen hyötyjen saavuttamisella viitataan siihen, että tuotantojärjestelmän tavoitteena on hyödyntää etuja kuten pienempiä kustannuksia, parempaa laatua ja lyhyempää tuotantoaikaa. Viimeisenä mainitaan standardien ja vakioitujen työvaiheiden kehittämisen tukeminen, jolla viitataan siihen, että suunnitellaan tuotantojärjestelmä, joka mahdollistaa työvaiheiden suorittamisen samalla tavalla työntekijästä riippumatta sekä valmiiden toimintamallien luomisen.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO

Tutkimusmenetelmät ja -aineisto -luvussa esitellään, miten tutkimuksen empiirinen osuus on toteutettu. Luvussa kerrotaan Hernesaaren telakalla suoritetusta tiedonkeruusta ja käytetyistä menetelmistä. Hernesaassa valmistettiin moduuleja neljään (A-D) samalle työmaalle valmistuvaan rakennukseen. Ensimmäisen tuotannossa olleen talon moduulien kokoonpano alkoi marraskuussa 2012, jolloin alkoi myös tätä työtä varten tarvittavan tiedon keräys. A-talon moduulien edistymisen oli melko katkonaista, sillä tuotantoa ohjaavana periaatteena oli, että tietyt työvaiheet tehdään ensin niin sanottuihin mallimoduuleihin, jonka jälkeen ne hyväksytetään NEAPOn edustajalla. Tämän jälkeen tietty vaihe voitiin toteuttaa myös muihin moduuleihin. D-talojen moduulien kokoonpano alkoi vuodenvaihteessa 2013 ja B- ja C-talojen kokoonpano helmi–maaliskuussa, jolloin kokoonpanon edistyminen oli huomattavasti nopeampaa.

4.1. Tutkimusmetodologia

Tämän diplomityön tutkimus on soveltavaa tutkimusta, jonka tarkoituksena on ratkaista tietyn tutkimustapauksen ongelmia ja toisaalta pohtia erilaisten toimintamenetelmien soveltuvuutta. Tutkimuskohdetta ja siihen liittyviä ilmiöitä lähdettiin tutkimaan kvantitatiivisena tapaustutkimuksena. Tapaustutkimuksen tarkoituksena on tuottaa yksityiskohtaista tietoa tutkittavasta tapauksesta, ja sille on tyypillistä, että tutkimustapausta tutkitaan yhteydessä sen ympäristöön, sekä aineistoa kerätään useita eri metodeja hyödyntämällä (Hirsjärvi 1997, ss. 130–131). Tutkimuksen tarkoituksena on kuvailla kerrostalomoduulien kokoonpanoa ja toisaalta kartoittaa mahdollisuuksia kerrostalomoduulien kokoonpanojärjestelmän suunnasta tulevaisuudessa. Hirsjärvi et al. (1997, s. 135) esittävät kirjassaan, että kuvailevan tutkimuksen tarkoitus on esittää tarkkoja kuvauksia tapahtumista ja tilanteista sekä dokumentoida ilmiön keskeisiä ja kiinnostavia piirteitä. Kartoittavan tutkimuksen tarkoitus taas on etsiä uusia näkökulmia ja ilmiöitä, selvittää vähemmän tunnettuja ilmiöitä sekä luoda hypoteeseja (Hirsjärvi et al. 1997, s. 134).

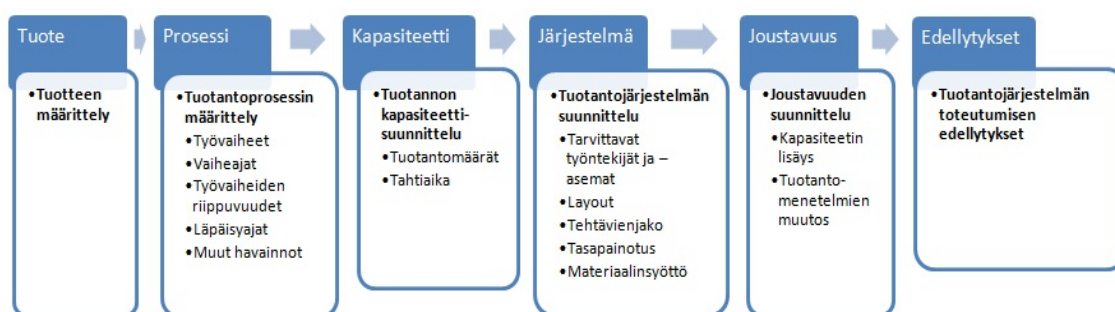
Diplomityössä käytettävän empiirisen tiedon keräämisen keinona on käytetty havainnointia. Havainnointia voidaan käyttää tutkittaessa mitä ihmiset tekevät. (Saunders et al. 2009, s. 288). Tarkemmin voidaan sanoa, että tietoa on kerätty pääosin käyttäen jäseneltyä havainnointia. Tällä tarkoitetaan kvantitatiivista tiedonkeräystä tutkittavista toiminnoista (esimerkiksi kuinka usein tiettyä asiaa tehdään) (Saunders et al. 2009, s. 300). Ajoittain diplomityön empiirisen tutkimuksen syventyessä oli havaittavissa myös osallistuvan havainnoinnin piirteitä. Osallistuvalla havainnoinnilla tarkoitetaan laadullisempaa tutkimusta ihmisten teoista sekä tekojen syistä osallistumalla toimintaan sen luonnollisessa ympäristössä (Saunders et al. 2009, ss. 289–290). Havainnoinnin aikana on

suoritettu myös huomattava määrä datankeräystä. Kyseistä dataa on käytetty moduulituotantoprosessin vaiheajojen määrittämiseen. Lisäksi tapaustutkimuksen lisänä on suoritettu kaksi benchmarking -käyntiä tuomaan tarkasteluun vertailunäkökulmaa.

Tuotantoprosesseja, kuten rakennustuotantoprosessia, voidaan tarkastella ylhäältä–alas tai alhaalta–ylös -lähestymistavoilla. Ylhäältä–alas -menetelmässä tarkastelua ja ratkaisua lähdetään rakentamaan prosessien kautta ja alhaalta–ylös -ratkaisussa tuotteiden kautta. Yleisesti teollisessa tuotannossa on käytetty ylhäältä–alas -lähestymistapaa kun taas rakennusprojekteissa alhaalta–ylös -lähestymistapaa. (Björnfot & Stehn 2004, ss. 7–8) Tässä tutkimuksessa ratkaisuvaihtoehtoisissa pyritään noudattamaan ylhäältä–alas -menetelmää.

4.2. Työssä käytetty moduulituotantokonseptin suunnittelumalli

Tässä diplomityössä käytettävä moduulikokoonpanon tuotantokonseptin suunnitteluprosessin toteutusmenetelmä on johdettu työn lukujen 2 ja 3 perusteella. Itse suunnittelu-prosessi on sovellettu pääosin luvusta kaksi ja sen pääpiirteet on esitetty luvussa 2.4. Luvusta 3 on johdettu suunnitteluprosessissa painotettavia osa-alueita, jotka on esitelty luvussa 3.7. Suunnitteluprosessin vaiheet on eritelty tarkemmin kuvassa 6.



Kuva 6. Työssä käytetty kerrostalomoduulien tuotantokonseptin suunnitteluprosessi.

Tuotantokonseptin suunnitteluprosessi on jaettu kuuteen osa-alueeseen, jotka käydään läpi järjestyksessä. Osittaista samanaikaisuutta osa-alueiden läpikäymisessä tulee kuitenkin olla. Lisäksi suunnitteluprosessissa voidaan palata edellisiin vaiheisiin, mikäli tarvetta on. Suunnitteluprosessi alkaa tuotteen ja tuotantoprosessin määrittelyllä. Tuote on määriteltä luvussa 1.4.2 ja luvussa 5.1.1. Tuotantoprosessin määrittelyssä käytetyt menetelmät ja kerätty aineisto on kuvattu luvussa 4.3. Tutkimuskohteen tuotantoprosessi on kuvattu luvussa 5. Tuotantokapasiteetin suunnittelulla viitataan halutun tuotantomäärän määrittämiseen ja tämän perusteella kysyntävauhdin laskemiseen. Tämä vaihe on kuvattu luvussa 6.1.2. Tuotantojärjestelmän suunnitteluun kuuluu kokoonpanolinjaan välittömästi liittyvien osa-alueiden suunnittelu. Tuotantojärjestelmän suunnittelu ja siinä käytettävät menetelmät on esitetty luvussa 6. Joustavuuden suunnittelulla viitataan moduulituotantokonseptin kannalta tärkeään, tulevaisuuden muutosten huomiointiin tuotantojärjestelmässä. Tätä on käsitelty luvussa 7 ja lisäksi joustavuus on huomioitu jo

luvussa 6. Suunnitteluprosessiin on kuudenneksi vaiheeksi lisätty myös tuotantojärjestelmän toteutumisen edellytykset, jolla viitataan muihin tuotantoon liittyviin toimintoihin, joilla on vaikutus tuotantojärjestelmän käyttöönoton onnistumiseen. Näihin asioihin on viitattu lyhyesti luvussa 7. Suunnitteluprosessista on jätetty pois yksityiskohtainen suunnittelu ja suunnitelman implementointi, sillä ne eivät kuulu tämän diplomityön rajauksen piiriin. Kuten myös aiemmin on todettu, tässä työssä pääpaino on suunnitteluprosessin osilla kaksi (tuotantoprosessin määrittely) ja neljä (tuotantolinjan suunnittelu).

4.3. Työntutkimus tuotantoprosessin määrittelyssä

Työn aikana suoritettiin yhteensä 221 tuntia käytännön havainnointia. Tästä 212 tuntia oli työntutkimusta Hernesaareen moduulituotannossa. Liitteessä 1 on esitetty tutkimuksen aikana suoritettujen havainnointien päivämäärät ja havainnointien pääkohde. Havainnointien pääkohteella tarkoitetaan pääasiallisena tavoitteena ollutta työntutkimuksen vaihetta. Lisäksi tuotannossa oltaessa tehtiin jokaisella kerralla havainnointia liittyen tuotannon edistymiseen ja jokapäiväiseen toimintaan, osallistuttiin urakoitsijalavereihin, keskusteltiin työntekijöiden kanssa ja kirjattiin näiden perusteella tehtyjä havaintoja. Henkilöt, joiden kanssa pääosa keskusteluista ja haastatteluista toteutettiin, on myös listattu.

Tuotantoon tutustuminen

Työntutkimuksen ensimmäisenä vaiheena oli tuotantoon tutustuminen. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että Hernesaarella sijaitsevassa tuotantoyksikössä suoritettiin haastatteluja, työn havainnointia ja suunnitelmiin, aineistoon sekä työntekijöihin tutustumista. Tarkoituksena oli saada yleiskuva siitä, miten moduuli kootaan ja kuinka paljon erilaisia toimijoita siihen vaaditaan. Lisäksi tutustumisvaiheessa kirjattiin ylös huomioita tuotannosta ja sen järjestelystä ulkopuolisen näkökulmasta.

Samalla kerättiin tietoa myös siitä, millaisia suunnitelmia NEAPOn johdolla on moduulituotannolle tulevaisuudessa. Tulevaisuuden suunnitelmiin liittyy oleellisesti tavoitteita tulevaisuuden moduulien ominaisuuksista, volyyymista ja läpäisyajasta. Näitä tietoja kerättiin diplomityötä käsittelevissä tapaamisissa ja lisäksi yleisissä keskusteluissa.

Työvaiheiden määrittäminen

Moduulikokoonpanoon sisältyvistä työvaiheista ja niiden järjestyksestä hankittiin tietoa monin keinoin. Pääosassa tässä vaiheessa oli A-talon neljäntoista moduulin työvaiheiden edistymisen seuranta. Seuranta tapahtui kirjaamalla ylös ja valokuvaamalla tehty ja uudet vaiheet vähintään kerran viikossa. Kyseiset vaiheet kirjattiin työvaiheiden suoritustaulukkoon (liite 2), jossa moduulit olivat eriteltynä. Tämän perusteella tehtiin myös lista tämän työn ratkaisuvaihtoehtojen kannalta oleellisen kokoisista työvaiheista ryhmiteltynä (liite 3). Työvaiheiden keruun tuloksena tehtiin myös työvaiheiden väliset

riippuvuudet ilmaiseva taulukko, josta nähdään mitkä työvaiheet tulee suorittaa ennen kyseisen työvaiheen suorittamista (liite 4).

Työvaiheet on tässä työssä eriteltyä kokonaisuuksiksi, jotka käytännössä yksi työryhmä pystyy suorittamaan itsenäisesti ilman keskeytyksiä, kun vaadittavat edeltävät tehtävät on suoritettu. Tämä nähtiin sopivan tarkaksi tasoksi diplomityön tavoitteet huomioiden. Tämä siksi, että näin voidaan jakaa työvaiheet eri työasemille, kuitenkin puuttumatta tarkemmin työasemien sisäisiin tehtävänjakoihin.

Oman havainnoinnin lisäksi työvaiheista kerättiin tietoa haastattelemalla työntekijöitä, työnjohtoa ja suunnittelijoita. Työvaiheiden edistymisestä keräsi tietoa myös kokoonpanossa paikalla oleva NEAPOn edustaja sekä alihankkijan työnjohto. Nämä tarkistuslistat olivat käytössä myös tämän diplomityön aineistona. Myös aikaisempien moduulitaloprojektien tietoja käytettiin hyväksi. Aikaisemmista vaiheista oli olemassa valmiusasteraportteja, joista käy ilmi tiettynä päivämääränä valmiina olleet vaiheet. Raporteissa eri työvaiheet oli määritelty, joten niitä pystyi hyödyntämään vaiheiden järjestysten riippuvuuksien tutkinnassa.

Jokaisesta työvaiheesta tehtiin oma työkorttinsa, jossa on työvaiheen nimi, kuva, edeltävät tehtävät sekä vaiheaika. Lisäksi kortteihin on kerätty lisätietoja muun muassa kuvimaisajoista tai muista erikoisominaisuuksista. Kortteja käytettiin hahmottamaan selkeämmin tuotantoprosessia ja eri työvaiheiden riippuvuuksia. Lisäksi niiden avulla pohdittiin erilaisia ratkaisuvaihtoehtomahdollisuuksia. Liitteessä 5 on esitetty esimerkki työvaihekortista.

Vaiheaikojen määrittäminen

Vaiheaikojen määrittäminen osoittautui haastavaksi. Hernesaaren tehtaalla tuotannossa oli 37 moduulia, joiden vaiheajat olivat keskimäärin melko pitkiä. Niinpä suositeltavia menetelmiä vaiheaikojen keräämiseksi ovat asiantuntija-arviot, työtanta, historiatieto ja kaikissa tapauksissa käyttökelpoinen standarditiedon hyödyntäminen. Näiden menetelmien lisäksi lyhyempien työvaiheiden ajan määrittämisessä menetelmänä käytettiin kelloa.

Vaiheaikojen mittaustarkkuudeksi sovittiin noin puoli tuntia. Tämä nähtiin hyvin riittäväksi tarkkuudeksi, sillä moduulikokoonpanon työvaiheet eivät aineistonkeräyksen vaiheessa olleet standardoituja ja vaiheaikoja haluttiin käyttää lähinnä lähtökohtana tuotantajärjestelmän suunnittelulle.

Vaiheaikojen keruu suoritettiin moduulikokoonpanossa. Tiedonkeruun pohjana toimivat ajanmittaukset tuotannossa suoritettujen työn ollessa käynnissä D-, B- ja C-talossa, työntekijöiden haastattelut, työtannan suoritukset ja rakennusteollisuuden standardiaikojen hyödyntäminen standardoiduissa työvaiheissa. Kerätyt vaiheajat on esitetty taulukossa

liitteessä 6. Kyseisiä aikoja on vertailtu keskenään, sekä pyritty määrittelemään mahdollisimman totuudenmukaiset ajat.

Työaikojen vertailussa huomioon otettiin työntekijöiden arviointeihin vaikuttavia tekijöitä, kuten keskeytyksiä, materiaalien noutoja sekä muita tekijöitä, jotka saattavat vääristää tuloksia. Arvioituja aikoja on verrattu itse kellotettuihin aikoihin ja työvaihekokonaisuuksiin menneisiin aikoihin. Rakennusteollisuuden määrittelemien standardiaikojen ja tuotannosta saatujen aikojen vertailussa on huomioitu myös teollisen rakentamisen mahdollistama standardiaikojen alittaminen. Kerätyn tiedon perusteella on liitteessä 7 esitetty mallimoduulien A6, A7, A13 ja A14 vaiheajat ja töiden kokonaiskestot. Nämä moduulit on valittu tarkasteluun, koska ne toimivat myös tuotannossa mallimoduuleina ja kyseiset asuntotyytit toistuivat myöhemmässä tuotannossa. Vaiheaikoja ei ole kuitenkaan kerätty juuri kyseisistä moduuleista, vaan samanlaisista moduuleista tuotannon myöhemmässä vaiheessa. Lisäksi on arvioitu, minkä työvaiheiden vaiheajat ovat riippuvaisia moduulin pinta-alasta, ja näiden kohdalla moduulikohtaiset vaiheajat on laskettu pinta-alan mukaan.

Vaiheaikojen keräämisen yhteydessä havainnoitiin myös moduulikokoonpanon edistymistä sekä vastaan tulleita ongelmia. Nämä toimivat lähtökohtana tarkempien kehittämiskohteiden määrittelyssä ja ratkaisuvaihtoehtojen kehittämisessä sekä vertailussa. Moduulikokoonpanon ongelmia on esitetty luvussa 5.

Läpäisyaikojen määrittäminen

Tämän diplomityön tärkeänä tavoitteena on pohtia kuinka moduulien läpäisyaikoja saataisiin lyhennettyä. Oleellisena osana kehitystä toimii lähtötilanteen määrittäminen, joten tässä tutkimuksessa kerättiin tietoa myös yksittäisten moduulien tuotannon läpäisyaajoista. Läpäisyaikojen keruu tapahtui havainnoimalla milloin tietyn moduulin valmistus alkoi ja milloin moduuli toimitettiin tehtaalta työmaalle. Työssä on käsitelty koko projektin läpäisyaikaa, yksittäisten moduulien kokoonpanon läpäisyaikaa sekä yksittäisten talojen läpäisyaikaa.

Mitatut moduulien läpäisyajat on esitetty liitteessä 8. Taulukoihin on kerätty yksittäisten moduulien kokoonpanon valmistuksen aloitus- ja työmaalle toimitusajankohdat.

4.4. Tutkimustulosten oikeellisuus

Tutkimuksen luotettavuutta voidaan arvioida määrittelemällä kuinka reliaabeli ja validi tutkimus on. Tutkimuksen reliaabeliudella viitataan siihen, ovatko tutkimuksen mittaus tulokset toistettavia. Reliaabelilla tutkimuksella on kyky antaa ei-sattumanvaraisia tuloksia. Tutkimuksen reliaabelius voidaan todeta esimerkiksi toistamalla mittaukset, toteamalla, että kaksi eri henkilöä on päässyt samaan tulokseen tai käyttämällä yleisiä mittareita, joilla voidaan vertailla saatuja tuloksia. Tutkimuksen validiudella viitataan sii-

hen, onko tutkimuksessa käytetyllä mittarilla tai tutkimusmenetelmällä onnistuttu mitaamaan juuri sitä, mitä oli tarkoitus mitata. (Hirsjärvi et al. 1997, ss. 226–227)

Kerätyn tutkimustiedon reliaabeliutta arvioitiin vertaamalla empiirisen tiedonkeruun tuloksia rakennusalan standardeihin, NEAPOn itse aiemmissa ja tässä projektissa keräämään dataan ja asiantuntijoiden antamiin arvioihin. Validiutta taas tutkittiin arvioimalla, että mikä oli tutkimustulosten kannalta tarkoituksenmukaista tietoa sekä kuinka eksaktia tietoa tarvittiin tai pystyttiin keräämään.

Työvaiheiden kohdalla ryhmittelyä ja työvaiheita sekä niiden oikeellisuutta ja sopivuutta tämän työn aineistoksi tarkasteltiin tekemällä vertailuja NEAPOn edellisestä projektistaan tekemiin moduulituotannon valmiusastetaulukoihin, Espoon Kilo -projektin aikatauluihin, sekä kysymällä asiantuntijoilta arvioita tehdystä jaottelusta. Näiden mukaan tulokset ovat olleet tarkoituksenmukaisia.

Vaiheaikojen kannalta tutkimustulosten oikeellisuutta tutkittiin tarkemmin kvantitatiivisella tasolla. Espoon Kilo -projektin arkkitehtikuvia käytettiin lähteenä eri työvaiheissa käsiteltävien työpintojen koon laskemisessa. Työpintojen alojen laskemisessa on käytetty pyöristettyjä arvoja, joten pinta-alat eivät ole täsmällisiä, mutta tarkkuudeltaan pinta-alat ovat kuitenkin huomattavasti tarkempia kuin vaadittaisiin puolen tunnin tarkkuudella laskemiseen. Tulokset on esitelty liitteessä 9. Näiden lukujen ja Rakennustieto -järjestelmän standardiaikojen (Palomäki et al. 2009; Mäki et al. 2003) perusteella on laskettu, kuinka kauan työvaiheissa olisi standardiaika perinteisellä tavalla rakennettaessa. Näitä aikoja verrattiin itse laskettuihin ja havainnoituihin aikoihin ja poikkeamien syyt analysoitiin.

Työvaiheeseen kuluva aika vaihtelee useista syistä. Näitä ovat muun muassa se, että monissa työvaiheissa tarvitaan melko korkeaa ammattiosaamista, joka kehittyy yksilöllisesti. Näin eri työntekijöiden väliset erot ovat havaittavissa. Myös työvaiheiden standardoinnin puute aiheuttaa sen, että työvaiheisiin kuluva aika saattaa poiketa eri moduulien kohdalla. Lisäksi urakoitsijoiden muiden töiden tai heistä riippumattomien häiriöiden takia tietty työvaiheen suorittaminen keskeytyi useilla toimijoilla useasti projektin aikana. Tämä taas aiheuttaa työvaiheen pidentymistä ja toisaalta vaikeutti työhön kuluvan ajan mittaamista. Myös materiaalien hakuun ja täydennykseen kului työntekijöiltä aikaa, mikä osaltaan vaikeutti tarkan työhön kuluvan ajan mittausta. Työntekijöiden antamien arvioiden kohdalla tulee huomioida, että ne ovat subjektiivisia. Näitä itse tehtyjä havaintoja vahvistavat myös Mullenin (2011, s. 100–102) esittämät vaiheaikojen ja niiden variaatioiden mittausta vaikeuttavat seikat, joita ovat työvaiheita suorittavat useat eri työntekijät, satunnaiset muutokset tehtävänannoissa, työntekijöiden tiheä liikkuminen moduuliin ja ulos, pidentyneet työvaiheen suoritusajat, visuaaliset näköesteet ja toistuvat viivästykset. Työvaiheiden pitkät kestoajat aiheuttivat myös sen että, tarkka stopwatch -tyyppinen mittaus ei ollut mahdollista. Tämä voi aiheuttaa mittaustuloksiin pieniä heittoja, mutta tästä syystä aiheutuneet poikkeamat lienevät alle puolen tunnin

mittaisia. Vaiheajoista voidaan todeta, että vaikka mittaustulokset olisivat kyseisillä mittauskerroille olleet tarkkoja, ei tiettyä standardiaikaa ole voitu Espoon Kilo -projektin puitteissa tietyllä työvaiheelle määrittää.

Edellisten huomioiden perusteella voi pohtia, onko valittu puolen tunnin tarkkuus ollut tarpeellinen työn kannalta vai olisiko voitu käyttää sen sijaan tunnin tarkkuutta. Toisaalta taas vaiheajojen mittauksessa on pyritty usean työvaiheen kohdalla käyttämään tarkempaa erittelyä kuin työvaiheet -taulukon ryhmittely. Kun vaiheajat on sitten määritelly työvaiheille suurempina kokonaisuuksina, voidaan olettaa, että yksittäisistä tekijöistä aiheutuvat erot työvaiheiden ajoissa tasaantuvat.

Tuotantojärjestelmän suunnittelun tavoitteena oli nopeuttaa läpäisyäikää ja tehostaa koko kokoonpanoprosessia. Tarkoitus siis on, että työvaiheisiin kulunut aika pienentyy jatkossa. Tämän takia voidaankin sanoa, että empiirisen tiedonkeräyksen myötä saadut tiedot ovat valideja ja reliaabeleja toimimaan tämän diplomityön tulosten lähtökohtana.

4.5. Kerätyn tiedon analysointi

Kerättyä tietoa on analysoitu tuotantoprosessin määrittämisen tueksi. Tuotantoprosessi on esitetty luvussa 5. Lisäksi tarkempi kerätty data on esitetty pääosin liitteissä (liitteet 1–10). Kerätystä tiedosta jalostettuja kuvaajia ja taulukoita on myös esitetty tekstin seassa luvussa 5.

Kerättyjen työvaiheiden ja vaiheajojen perusteella on luotu aikakaavio (liite 10) ja mallimoduulien vaiheaikataulukko (liite 9) kuvaamaan työvaiheiden kestoja, riippuvuuksia ja kokoonpanoprosessin teoreettista läpäisyäikää. Kaaviosta nähdään mitä vaiheita voidaan suorittaa samaan aikaan ja toisaalta mitkä työvaiheet ovat vapaita ja mitkä sidottuja tiettyyn suoritusajankohtaan. Taulukon yksi tärkeimmistä tarkoituksista on myös osoittaa, kuinka paljon moduulin läpäisyäikää voitaisiin pienentää pelkästään tehostamalla työvaiheiden välistä aikaa.

Aluksi tiedon analysoinnissa on huomioitu neljä erilaista mallimoduulia, jotka toistuvat myöhemmissä moduuleissa. Pidemmälle menevässä tarkastelussa on käytetty mallimoduulien A6 ja A14 tietoja, sillä nämä ovat vähiten ja eniten työtunteja vaativat moduulityypit. Tämän avulla on pystytty vertailemaan kuinka työhön kulunut aika, työntekijöiden tarve tai muut tekijät muuttuvat moduulin muuttuessa.

5. MODUULITUOTANTO KOHDEYRITYKSESSÄ JA VERROKKIYRITYKSISSÄ

Tässä luvussa esitellään diplomityön empiirisen tutkimuksen kohteena ollut NEAPOn moduulikokoonpanoprosessi Espoon Kilo -rakennusprojektissa. Luvussa esitellään ensin tuotetta eli asuntomoduulia, jonka jälkeen esitellään tuotantoprosessin työvaiheet, tukitoiminnot, tulevaisuuden suunnitelmat tuotteen suhteen ja tuotannon ongelmakohdat. Tässä luvussa täytetään myös johdannossa esitetty ensimmäinen alatavoite: varioituvan rakennuselementtivalmistuksen tuotantojärjestelmän ominaisuuksien määrittely. Luvun lopuksi on esitetty tiivistetysti verrokkiyritysten kappaleen siirto- ja materiaalinjakelumenetelmät.

5.1. Tuotantoprosessi

Espoon Kilo -rakennusprojektissa rakennettiin modulaarisesti 4 kaksikerroksista luhtitaloa. Asuntomoduulit olivat huoneiston kokoisia ja valmistettiin Helsingissä Hernesaaren telakalla. Huoneistoja eli moduuleita valmistettiin 37 kappaletta, jotka toimitettiin täysin varusteltuna työmaalle, jossa ne asennettiin talokokonaisuuksiksi. Huoneistoalaa kohteeseen tuli 1777 m². (Neapo Oy 2012)

5.1.1. Tuote

Projektissa valmistetut 37 moduulia olivat kaikki rakenteeltaan Fixcel® -teräskennoa, ja yksi moduuli muodosti yhden asunnon. Moduulit olivat kahta eri kokoa ja pohjapiirustuksiltaan 3 erilaista. Näistä valmistettiin myös peilikuvia. Lisäksi osassa moduuleista oli katto, joten erilaisia moduuleita oli yhteensä 12 erilaista. Moduulit varusteltiin tehtaalla lähes valmiiksi asti. Tarkoitus oli, että työmaalla ei tarvitse suorittaa kuin moduulin paikoilleen asennus, talotekniikan kytkentä ja ulkovuoraus- sekä parveketyöt. Valmistuessaan tehtaalta moduulit näyttivät jo valmiilta asunnoilta.

17 moduuleista oli pohjakerroksen asuntoja, joihin tuli tasainen katto. Loput 20 moduuleista taas olivat toisen kerroksen asuntoja, joihin valmistettiin tehtaalla puinen harjakatto. Toisen kerroksen asuntojen suurempi lukumäärä selittyy sillä, että kohteen D-talon ensimmäisen kerroksen yleiset tilat rakennettiin työmaalla perinteiseen tapaan.

5.1.2. Tuotantoprosessi ja työvaiheet

Hernesaarella toteutunut tuotantoprosessi voidaan jakaa viiteen pääryhmään, jotka ovat runkotyöt, puukattotyöt, sisustus, LVIS -työt ja ulkoeristys. Nämä ryhmät sisältävät

useita lyhyempiä työvaiheita, jotka on listattu liitteessä 3. Työvaiheiden vaiheajat on listattu liitteessä 9.

Runkotyöt sisältävät teräskennorakenteista muodostuvien seinien ja lattioiden kokoonpanon moduulimuotoon. Lisäksi tähän vaiheeseen kuuluu kiinnitysruuvaukset ja teräslistojen asennukset.

Puukattotyöt viittaavat työvaiheeseen, jossa toisen kerroksen asuntoihin rakennetaan puuharjakatto. Tähän vaiheeseen kuuluu kattorakenteen valmistus, siirto paikoilleen ja eristeiden sekä kattohuovan asennus.

Sisustus sisältää ryhmistä eniten työvaiheita. Siihen kuuluu sekä märkä- että kuivatilojen sisävuoraus, kalusteasennukset ja varustelu.

LVIS -työt sisältävät nimensä mukaisesti, lämpö-, vesi-, ilmastointi- ja sähköasennukset. Näihin kuuluu putkien veto sekä laiteasennukset. LVIS -työt on teetetty omien alojensa asiantuntijaurakoitsijoilla.

Ulkoeristys on muista työvaiheista melko riippumaton ryhmä. Siihen kuuluvat palo- ja lämpöeristysasennukset seiniin sekä lattiaan ja joissain kohteissa julkisivukäsittely. Kilonpurontie -hankkeessa rappaus tapahtui työmaalla.

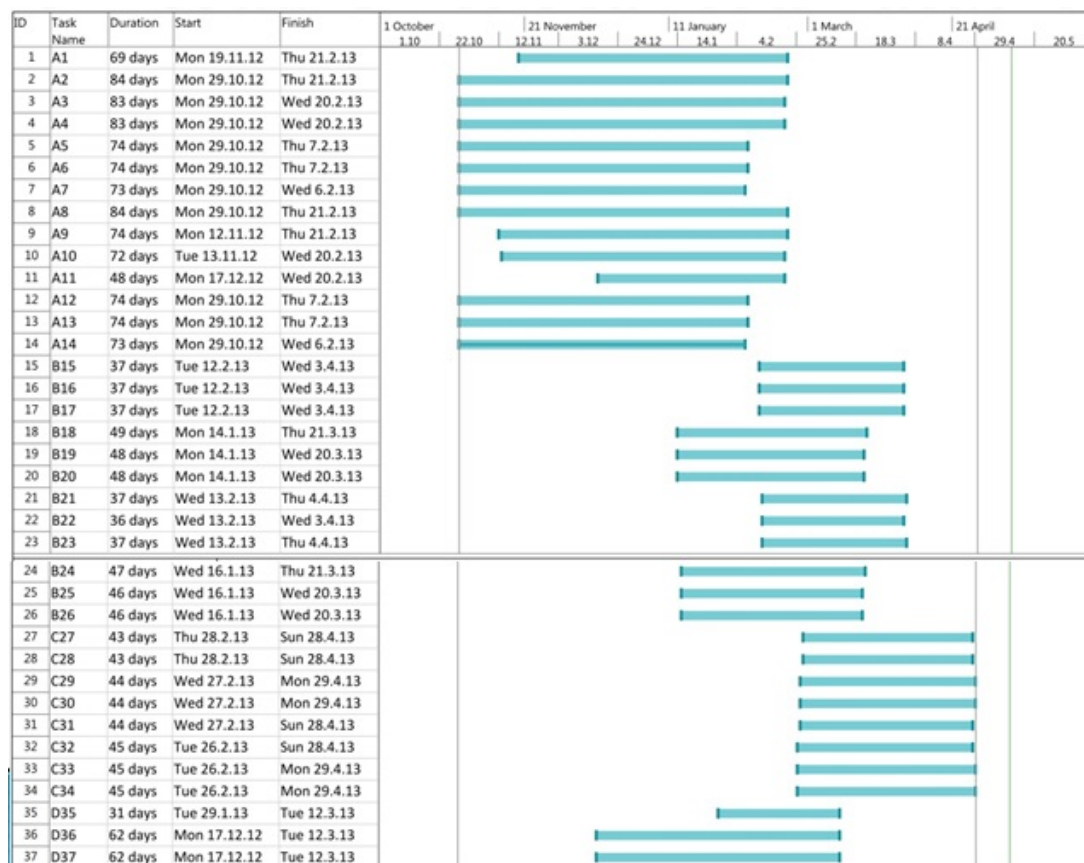
Vaikka moduulien kokoonpano tapahtuu sisätiloissa hallissa, muistuttavat työvaiheet pitkälti perinteisen rakentamisen käytäntöjä. Suurimpia eroja perinteiseen kerrostalorakentamiseen on se, että moduulit ovat erillisiä asuntoja ja ne sijaitsevat samassa tasossa. Työvaiheet, jotka eroavat eniten perinteisestä rakentamisesta ovat moduulien seinä- ja lattiarakenteiden kokoaminen, ylimmän kerroksen kattorakenteen valmistus lattiatasossa, LVIS -kuilun työt ja kytkennät moduulien välillä, sekä moduulin pohjan eristystyöt, jotka suoritetaan tehtaalla. Tuotannon työntekijöiden ammattiosaaminen tulee olla korkealla tasolla, jotta he voivat suorittaa heille nimetyt työtehtävät. Eri työtehtävissä tarvitaan erilaista osaamista, joten tarvittavien ammattilaisten määrä on suuri.

Tuotannossa käytössä olevat työkalut ja -koneet ovat lähinnä pieniä käsikäyttöisiä koneita. Erikoiskoneita ja automaatiota ei tuotannossa ole käytössä, ja suurin osa materiaalien syötöstä työpisteille tapahtuu työmiesten omin voimin. Suurempien materiaalien tai pakkausten liikuttamiseen on käytössä katonostimia, trukkeja ja nostolavoja.

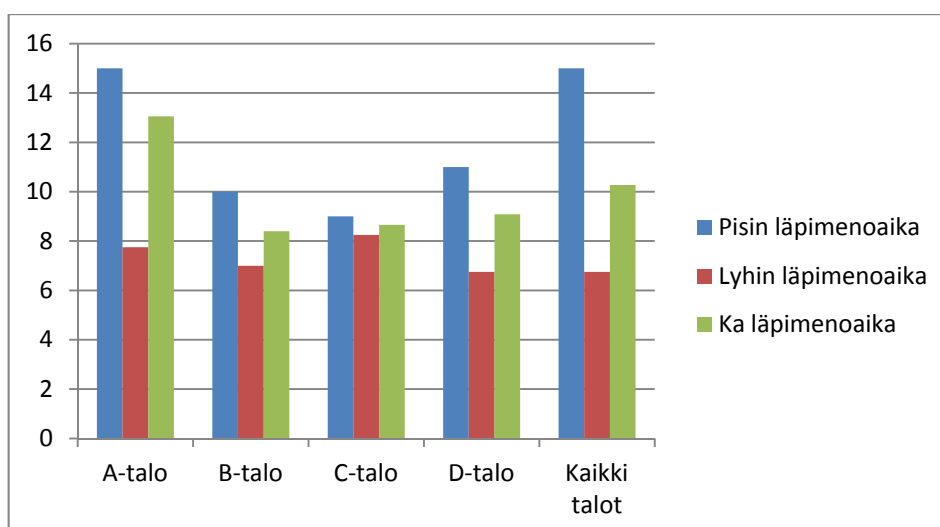
Tuotantoprosessin kriittisiksi vaiheiksi voidaan lukea moduulin runkorakenteiden kasaaminen ja kipsilevytys (vievät paljon aikaa); kylpyhuoneen lattiakaadon, kaakeloinnin, tasotustöiden ja maalauksen vaatima kuivumisaika (ei vältettävissä olevaa arvoa tuottamattomasti aikaa); moduulien nostot ja siirrot (riskit moduulin vaurioitumiseen, nosto-/siirtokapasiteetti) sekä työmaalle lähetettävien moduulien toimitusjärjestys ja toimittajat (valmiin tuotteen varastointi).

5.1.3. Tuotantoaikataulu ja läpäisyajat

Kuvassa 7 on esitetty Hernesaarella tapahtuneen moduulituotannon toteutunut aikataulu. Liitteessä 11 on esitelty tuotannon alkuperäinen suunniteltu aikataulu. Kuvassa 8 on esitetty talokohtaisesti yksittäisten moduulien tuotannon läpäisyajat.



Kuva 7. Toteutunut tuotantoaikataulu.



Kuva 8. Moduulien tuotannon läpäisy aika viikkoina.

Kuvassa 8 läpäisyajat on esitetty viikkoina, ja tuotannon alkuvaiheen moduulien kohdalla on vähennetty vuodenvaihteen kahden viikon työskentelytauko. Työvaiheiden vaiheikalistausta, tuotannon toteutunutta aikataulua ja läpäisyajoja tutkittaessa voidaan huomata, että myös NEAPOn tapauksessa läpäisyajasta vain murto-osa kuluu varsinaiseen tuotteen jalostamistyöhön. Tämä on linjassa Hopp et al. (1990, s. 78) havaintojen kanssa (kts. Luku 2.2.3.).

5.1.4. Moduulituotannon kustannukset

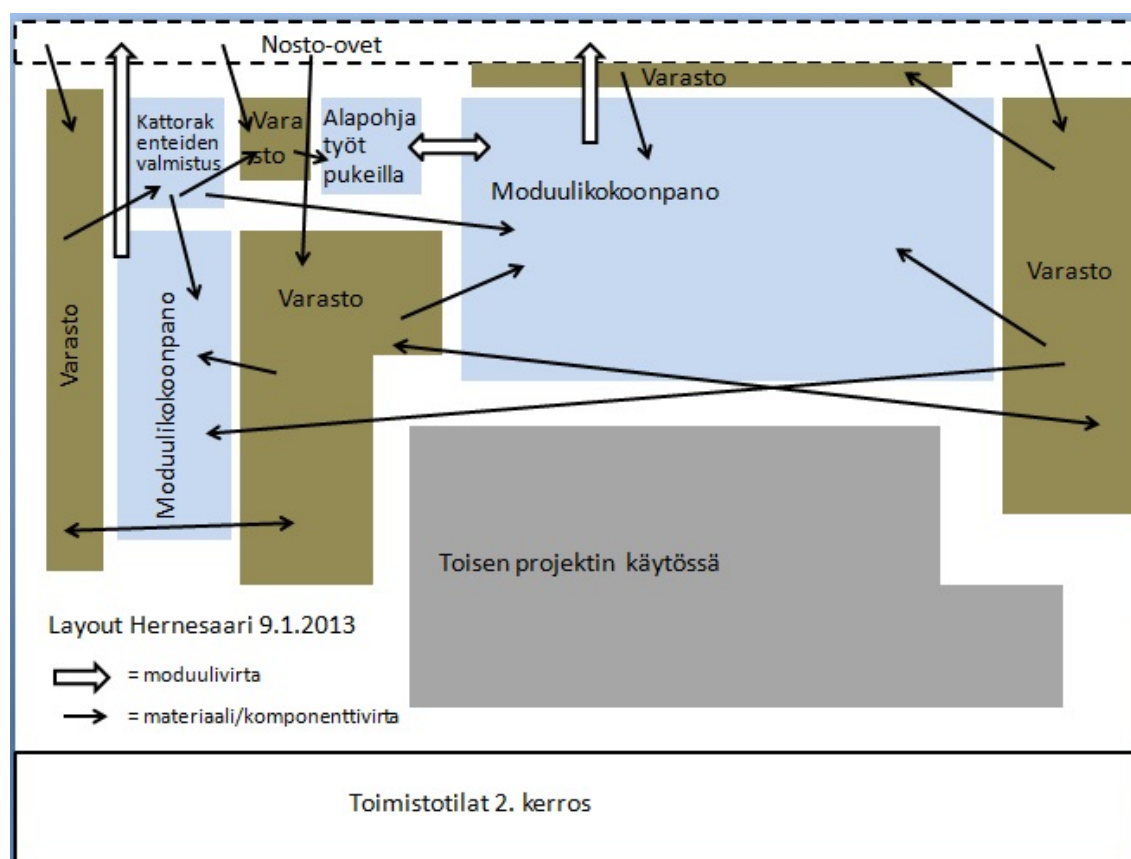
Tähän mennessä moduulituotannon muuttuvat kustannukset NEAPolla ovat jakautuneet materiaalien ja työvoiman suhteen melko tasan. Yleisesti moduulituotannon myyntituotoista 45–50 % kuluu materiaalihankintoihin, 35–45 % yleiskustannuksiin (sisältäen liikevoiton) ja 10–20 % välittömiin ja välillisiin työvoimakustannuksiin (Mullens 2011, s. 30).

Voidaan siis todeta, että NEAPolla työvoimakustannukset ovat suhteessa isommat kuin yleisesti modulaarisen rakentamisen alalla. Jatkossa tavoitteena on, että työvoiman kustannukset olisivat huomattavasti pienemmät kuin materiaalikustannukset.

5.1.5. Tavaroiden toimitukset ja varastonhallinta

Materiaalien hankinta ei Hernesaaren moduulituotannossa ollut keskitettyä, vaan osan materiaaleista hankki NEAPO ja osan pääalihankkija alihankkijoiden tarpeen mukaan. Jotkut LVIS -töiden vakioiduista materiaaleista tulivat alihankkijoiden kautta. Kun alihankkija tarvitsi tiettyä materiaalia, ilmoitti hän siitä työnjohdolle, joka hoiti tilauksen. Toimitusajat vaihtelivat toimittajasta riippuen, eikä erikoisempia kumppanuuksia toimittajien kanssa ollut sidottu. Näinpä toimituspäivämääriä ei etukäteen voitu aina tietää. Osa materiaaleista saapui kokoonpanohalliin liian aikaisin, ja ne jouduttiin varastoimaan pitkäksi aikaa ja toisaalta osa työvaiheista saattoi viivästyä puuttuvien materiaalien takia.

Kuvassa 9 on esitetty tuotantotilojen layout tammikuussa 2013. Huomattavaa on, että layout ei ollut vakiintunut, vaan se vaihteli projektin läpi. Suurin vaihtelu oli varastopaikkojen sijainneissa ja määrissä. Kuvaan on myös hahmoteltu materiaalivirtoja. Kokoonpanoalueilla oli useampia moduuleita vierekkäin paikkakoonnissa, mutta kuvassa ne on hahmottamisen helpottamiseksi piirretty yhtenäisiksi alueiksi.



Kuva 9. Tuotantotilojen layout ja materiaalivirrat tammikuussa 2013.

Kuvasta 9 nähdään varastojen sijainnit sekä materiaalivirtojen yksinkertaistettu kulku tuotantoprosessin alkuvaiheessa. Varaston sen hetkisen koon määrittäminen tapahtui visuaalisesti. Materiaalien siirtoon oli käytössä trukkeja sekä katonostureita.

5.1.6. Urakoitsijoiden hallinta

Tuotannon tehtävät tapahtuivat urakoitsijoiden toimesta. Pääurakoitsija hoiti tuotannon työnjohton. Lisäksi eri työvaiheissa oli käytössä noin kymmenen urakoitsijayritystä, jotka olivat pääosin pieniä yrityksiä. Kommunikointi urakoitsijoiden, työnjohton ja NEAPOn välillä tapahtui viikoittaisilla urakoitsijapalavereilla sekä tarvittaessa vapaa- muotoisesti työnjohton ja NEAPOn edustajan kanssa. Käytännössä kommunikointi oli hyvin vilkasta.

Urakoitsijoiden välillä esiintyi ajoittain ristiriitaisuuksia ja vastuunjaosta oltiin hyvin tarkkoja. Myös viivästyneiden työvaiheiden kohdalla saatettiin vastuu siirtää toiselle urakoitsijalle vedoten vapaan työskentelytilan puutteeseen tai edellisen työvaiheen valmistumisen myöhästymiseen. Kun käytetään useampaa urakoitsijaa, on osaoptimoinnin riski ilmeinen.

5.1.7. Suunnittelu ja aikataulutus

Suunnittelu ja aikataulutus tapahtuivat pääosin NEAPOn omien työntekijöiden toimesta. Arkkitehtipiirustukset tehtiin yhteistyössä arkkitehtitoimiston kanssa. Rakennepiirustukset ja aikataulusuunnittelu tehtiin NEAPOssa.

Tuotannon toteutumista NEAPO seurasi merkkamalla moduulin työvaiheiden valmiusasteen (0 %, 25 %, 50 % tai 100 %) Excel -pohjaiseen taulukkoon. Tätä verrattiin laadittuun aikatauluun, jonka jälkeen tiedettiin, että oltiinko aikataulussa vai ei. Tuotannolle aikataulut tiedotettiin palaverissa ja ne olivat esillä paperilla tuotantotiloissa.

5.1.8. Tuotannolliset tavoitteet tulevaisuudessa

NEAPolla on itsellään tavoitteita ja suunnitelmia tuotteen ja sen tuotannon tulevaisuudelle. Ensisijaiset tavoitteet ovat, että tuotannon volyymiä kasvatetaan huomattavasti nykyisestä tasosta ja että moduulien läpäisyaikaa saadaan lyhennettyä huomattavasti nykyisestä.

Volyymi on tarkoitus nostaa lähivuosina 250–500 moduulin vuositasolle. Tarkoitus on, että kun moduulikokoonpanokonsepti on kehitetty, toimii tehdas kahdessa työvuorossa. Moduulien läpäisyajan lyhentäminen on yksi päätavoitteista ja pyrkimys olisikin, että moduulin läpäisyaikaa voitaisiin mitata kuukausien sijaan viikoissa.

NEAPOn tavoitteena on kehittää moduulien suunnittelutyötä tukemaan sujuvaa tuotantoa. Kehityksen kohteena on muun muassa piirustusten mitta- ja yksityiskohtainen tarkkuus. Tätä onkin pidetty lähtökohtana uuden kokoonpanokonseptin kehityksessä.

5.2. Nykyisen tuotannon vahvuuksia

NEAPOn aikaisempien projektien ja yrityksen kehityksen aikana on noussut esiin toiminnan vahvuuksia. Osa näistä liittyy suoraan ja osa heijastuu tuotantoon.

Moduulituotannon herättämä kiinnostus: moduulituotanto on herättänyt yleisesti suurta kiinnostusta eri sidosryhmissä ja odotukset ovat suuret. Tämä on positiivista moduulirakentamisen leviämisen, tuotantovolyymien ja moduulituotannon kehittymisen kannalta.

Tutkimus ja innovatiivisuus: NEAPO on tehnyt paljon tutkimustyötä yhdessä eri yritysten ja esimerkiksi Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen kanssa. Tutkimusten avulla on saatu aivan uutta tietoa moduulirakentamisesta. Uusi tieto ja uudet toteutustavat tuovat kilpailuetua, sillä NEAPO saa etumatkaa teollisen rakentamisen hyötyjen saavuttamisessa kilpailijoihin verrattuna.

FIXCEL® -teräskenno: NEAPolla on yksinoikeus FIXCEL® -kennoteknologian käyttöön maapuolella. Kennoteknologia mahdollistaa kevyet, mutta lujat rakenteet, jolloin

suuretkin moduulit on mahdollista tuottaa täysin tehdasvalmisteisesti. Lisäksi valmiit kennorakenteet nopeuttavat tuotantoprosessia.

Työskentelyolosuhteet: moduulien valmistuksen tapahtuessa tehdastiloissa saavutetaan monia hyötyjä. NEAPO voi ylläpitää moduulituotantoa ympäri vuoden säästä riippumatta. Lisäksi työskentelyn tapahtuessa sisätiloissa työturvallisuus paranee. Hallituissa olosuhteissa tapahtuva työskentely mahdollistaa myös tuotannon paremman ohjattavuuden ja laadun.

Nopeus: rakennushankkeeseen kuluva aika on saatu pienennettyä, kun työmaatyö ja moduulituotanto voidaan suorittaa samaan aikaan. Lisäksi valmiiden moduulien asennus paikoilleen työmaalla on ollut hyvin nopeaa.

Toiminnan kehittyminen: NEAPON moduulituotanto on kehittynyt toteutettujen projektien myötä. Aikaisemmista projekteista on opittu ja oppeja on pyritty hyödyntämään seuraavissa projekteissa. Kehittyneitä osa-alueita ovat olleet esimerkiksi kustannustenhallinta, laatu, suunnitelmien valmius ja hankinnat.

5.3. Linjatuotantoon siirtymisen haasteet

Luku on poistettu luottamuksellisista syistä.

5.4. Havainnot verrokkiyrityksissä

Empiirisen tutkimuksen osana toteutettiin myös kaksi benchmarking -vierailua. Vierailut sisälsivät yleisesittelyn yrityksestä, strukturoimattoman haastattelun sekä esittelyn tuotantotiloissa. Ensimmäisellä vierailulla keskityttiin raskaiden tuotteiden siirtotekniikkaan ja toisella vierailulla taas pääpaino oli linjojen tasapainotuksessa sekä varioituvan tuotannon ongelmakohtissa. Tähän lukuun on kerätty tämän tutkimuksen kannalta oleellisia huomioita benchmarking -käynneiltä. Liitteissä 12 ja 13 on esitetty tarkempi kuvaus vierailujen sisällöstä.

5.4.1. Siirtotekniikat

Ensimmäisessä benchmarking -kohteessa kappaleet kulkevat linjan läpi ilmatyynyllisellä laverilla. Ilmatyynyä ohjataan kauko-ohjaimella, jolla kappaletta voidaan esimerkiksi pyörittää paikallaan tai tilan salliessa ohittaa toinen kappale. Nämä ovat ilmatyynysiirtojärjestelmän ehdottomia etuja. Ilmatyynyä vaatii kuitenkin lattiapinnalta siisteyttä ja jokaisen vuoron päätteeksi lattiat pestäänkin lattianhoitokoneella siirron yhteydessä. Kun ilmatyynyä on kulkenut linjan loppuun ja valmis kokoonpano toimitettu eteenpäin, palautetaan se linjan alkuun siltanostimella. (X1 2013)

Toisessa benchmarking -kohteessa kappaleiden suurten komponenttien liikuttelu tapahtuu katonostimien avulla. Kun kappaleen runko on koossa, sitä liikutellaan pyörällisellä

laverilla, jonka liikuttamiseen on käytössä paineilmalla toimiva ohjain. Kappaleen loppukokoonpanolinjalla kappaleeseen liitetään renkaat, jonka jälkeen se liikkuu oman moottorinsa avulla. (X2 2013)

5.4.2. Varioituvan tuotantolinjan materiaalinjakelu ja tasapainotus

Ensimmäisessä benchmarking -kohteessa kokoonpanoon liitettävät moduulit tuodaan linjan yhteyteen yksi kerrallaan vain seuraavaa vuoroa varten. Tämä mahdollistaa linjan selkeyden ja siisteyden. Lisäksi linjan yhteyteen tuodaan osasetti kokoonpanossa tarvittavista muista osista sekin vuoro kerrallaan. Kiinnitys- ja muut pientarvikkeet varastoidaan linjan yhteydessä lokerikossa, jonka täydennyksestä toimittajat vastaavat. Jokaisella työasemalla on tarvittavat asemakohtaiset työkalut, jotka ovat järjestettynä liikuteltaviin työkalukärryihin. Alikokoonpanot tapahtuvat kokoonpanolinjan vieressä. Alikokoonpano tapahtuu samassa tahdissa kokoonpanon kanssa. Alikokoonpano tuotiin kokoonpanon yhteyteen visuaalisen ohjattavuuden lisäämiseksi. (X1 2013)

Toisessa benchmarking -kohteessa materiaalinhallinta perustuu materiaalien luokitteeluun. Sekvenssikomponentit ovat kalliita materiaaleja, joita ei haluta varastoida vaan ne tilataan loppuasiakkaan tilauksen mukaisesti. Sekvenssikomponentteja on noin kymmenen. Toimittajien kanssa on tehty kumppanuussopimuksia, joiden ansioista materiaalit saadaan 10 päivän sisällä. Osaa materiaaleista tilataan myyntiennusteiden mukaan ja pientarvikkeet taas hankitaan kaksilaatikkojärjestelmän mukaisesti. Pääkokoonpanolinjan viereen on pyritty sijoittamaan asemakohtaisesti tarvittavat materiaaliavarastot. Kuitenkaan kaikki materiaali ei välttämättä mahdu aseman viereen, joten niitä saatetaan joutua hakemaan kauempaa. Tähän menee turhaa aikaa, mutta tilan puutteen vuoksi tästä ei ole päästy eroon. Tämä kuormittaa myös trukkikuskeja, ja suurten komponenttien saatavuus on heidän varassaan. Jokaisella työasemalla on myös asemakohtainen perustyökaluvaunu ja lisäksi asemalla käytettävät erikoistyökalut. Pääkokoonpanolinjan rinnalla toimii useita osakokoonpanoja. Osakokoonpanot on pyritty sijoittamaan niin, että visuaalinen synkronointi olisi mahdollista. Tämä ei kuitenkaan kaikissa tapauksissa ole onnistunut ja osakokoonpanojen ja pääkokoonpanon synkronoinnissa onkin ollut huomattavia hankaluuksia. (X2 2013)

Ensimmäisessä benchmarking -kohteessa tasapainotuksessa on hyödynnetty työntekijöiden liikuttamista työasemien välillä (X1 2013). Toisessa kohteessa toteutettiin muutamia vuosia sitten pääkokoonpanolinjan kehittämisprojekti, jonka tarkoitus oli tasapainottaa työasemien välisiä työaikaeroja. Työntutkimusta korostettiin hyvin tärkeänä osa-alueena tuotantolinjan tasapainotuksessa. Tuotevariaation suhteen tavoitteena on, että sekä päälinjalla että osakokoonpanoissa työntekijät toimisivat tiimimaisesti ja tasapainottaisivat tuotannon tiimin sisällä itsenäisesti. Linjakokonaisuuden sisällä työntekijät voivat vaihdella paikkoja tarpeen mukaan. (X2 2013)

6. TUOTANTOJÄRJESTELMÄVAIHTOEHTOJEN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa esitetään diplomityön teoreettisen ja empiirisen tutkimuksen tuloksena syntyneet ratkaisuvaihtoehdot ja niiden vertailu. Ratkaisuvaihtoehtojen vertailun pohjana käytetään luvussa aluksi esitettyjä kriteerejä sekä viitataan lyhyesti siihen, mistä tutkimuksen osa-alueesta kriteerit on johdettu.

6.1. Kriteerit ja lähtökohdat ratkaisulle

Tuotantojärjestelmävaihtoehtojen kehittäminen aloitettiin tutkimalla teoriaa ja perinteisiä tuotantojärjestelmävaihtoehtoja. Lähtökohtana ratkaisulle oli, että tuotantoprosessia saataisiin muutettua sisätiloissa rakentamisesta kohti teollista moduulituotantoprosessia. Ratkaisu on jaettu osa-alueisiin, joissa tarkastellaan ratkaisuvaihtoehtoja yksi kerrallaan. Osa-alueiden sisällä vaihtoehtojen kehittäminen aloitettiin niin sanotusta ylhäältä–alas -tarkastelusta, jossa vaihtoehtoja pohdittiin hyvin konseptuaalisella tasolla. Tämän jälkeen kriteerien täytyessä on ratkaisun osa-alueiden vaihtoehtoja tarkennettu esimerkiksi sijoittamalla työvaiheita työasemille. Tässä käytettiin apuna luvussa 4.3 kuvattuja kortteja. Ratkaisun tarkoituksena on esittää malli siitä, kuinka voidaan lyhyellä ja pitkällä aikavälillä kehittää tuotantojärjestelmää, joka pystyy reagoimaan työvaiheiden ja tuotteen kehityksen mukana tuomiin muutoksiin.

6.1.1. Ratkaisun rakenne

Kuten ylhäällä on todettu, ratkaisuvaihtoehtojen tarkastelu on jaettu pienempiin osa-alueisiin. Nämä osa-alueet on johdettu johdannon tavoitteista. Osa-alueet käydään yksitellen läpi, jonka jälkeen voidaan muodostaa kokonaisratkaisu.

Aihe-alueet ovat:

1. *Varioituvan rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmän ominaisuuksien määrittely*, joka on käsitelty jo teorian yhteenvedossa sekä edellisessä luvussa tuotantoprosessin määrittämisen yhteydessä.
2. *Talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttävän layoutin suunnittelu tehtaalle.*
3. *Työasemien työtehtävien ja materiaalikäsittelyn organisointi tehokkaasti, hukkia minimoiden.*
4. *Moduulikokoonpanon tasapainotus ja aikataulutus.*

Ensimmäisenä layoutratkaisuvaihtoehtona on perinteinen kokoonpanolinja. Tästä on tehty tarkemmat analyysit ja muut ratkaisuvaihtoehdot on rakennettu tämän pohjalta. Kolmannessa aihe-alueessa suoritetaan tehtävänjako edellisessä vaiheessa kehitetyille layouteille. Toisen ja kolmannen aihe-alueen käsittelyn jälkeen vertaillaan siihen asti mukana olleita ratkaisuvaihtoehtoja ja päätetään, mitkä ratkaisuvaihtoehdot otetaan tarkasteluun vielä neljännen aihe-alueen osalta. Neljännessä vaiheessa vertaillaan erilaisten varioituvan tuotannon tasapainotuksen menetelmien soveltuvuutta tutkimustapaukseen. Tämän jälkeen kyseisiä menetelmiä sovelletaan ratkaisuvaihtoehtoihin.

Ratkaisuvaihtoehtojen vertailu suoritetaan pisteyttämällä vaihtoehdot neljännen vaiheen jälkeen. Tämän jälkeen suositeltavasta ratkaisuvaihtoehdosta esitellään toimenpidesuosituksia ja havainnollistetaan materiaalinjakelua tarkemmin. Jo pohdittujen aihe-alueiden lisäksi tavoitteena oli pohtia tuotantokonseptia myös pidemmällä aikavälillä. Tällä hetkellä moduulituotannon elinkaari on hyvin alussa ja kysyntä vaihtelevaa, joten moduulituotannon kehittämisessä keskitytään perusasioihin. Kuitenkin jatkossa volyymin kasvaessa ja kilpailun lisääntyessä, tulee pyrkiä jatkuvaan kehittymiseen. Niinpä osana ehdotettuja toimenpiteitä on myös tarkasteltu ja visioitu tulevaisuutta ja tulevaisuudessa kehitettäviä osa-alueita.

6.1.2. Tuotannon kapasiteetti

NEAPOn tavoitteiden mukaista olisi valmistaa 250–500 moduulia vuodessa. Aluksi kysynnän ollessa vielä vaihtelevaa ja epävarmaa voitaisiin toimia yhdessä vuorossa arkipäivisin. Kuitenkin kysynnän kasvaessa NEAPOn tavoitteena on, että voitaisiin siirtyä toimimaan kahdessa vuorossa. Niinpä tuotantojärjestelmän tulee olla muutettavissa kaksivuoroiseksi riittävän helposti. Vuonna 2013 työpäiviä on Teknologiateollisuuden (2012) mukaan 251. Tämän perusteella tuotantovauhti tulisi olla keskimäärin yksi moduuli vuorossa.

Ratkaisuvaihtoehtoja koskeissa laskelmissa on käytetty lähtökohtana Hernesaaren moduulikokoonpanossa valmistetuissa moduuleista mallimoduulia A6, jonka työtunnit olivat pienimmät sekä mallimoduulia A14, jonka työtunnit olivat suurimmat. Ratkaisuvaihtoehtojen kehittämisessä ja arvioinnissa kriittisinä ohjaavina työvaiheina olivat moduulin rungon kasaaminen ja levytys, koska ne ovat huomattavan työllistäviä. Lisäksi kriittisiä tekijöitä olivat tarvittavat kuivumisajat sekä moduulien nostot ja siirrot.

6.1.3. Ratkaisun tavoitteet

Ratkaisuvaihtoehtojen vertailussa käytettävät kriteerit sovellettiin NEAPOn antamista lähtötiedoista ja tavoitteista, tässä tutkimuksessa käytettävistä viitekehyksistä sekä käytetyistä case -esimerkeistä. Kriteerit on jaettu yleisempiin kriteereihin, jotka koskevat koko tuotantojärjestelmää, sekä tarkempiin kriteereihin, jotka perustuvat tuotannon eriteltyihin ongelma-alueisiin.

Läpäisyajan lyhentäminen oli yksi tämän tutkimustyön päätavoitteista. Ratkaisuvaihtoehdon yhtenä kriteerinä pidetään siis, että moduulikokoonpanon läpäisyaikaa saadaan pienennettyä nykyisestä. Yksittäisen asuntomodulin läpäisy aika oli Espoon Kilo -projektissa enimmillään 15 viikkoa ja lyhimmillään 6 viikkoa ja 3 päivää.

Yksi NEAPON asettamista tavoitteista oli mahdollistaa keskenään erilaisten ja erikoisten moduulien valmistus samanaikaisesti tehtaalla. Tuotantojärjestelmän tulee siis olla sellainen, että se sopii varioituvaan tuotantoon. Teorian lukujen 2.3.2., 2.3.4. ja 2.4. mukaan tuotantojärjestelmän tulee olla suunniteltu joustavaksi, jotta se pystyy mukautumaan varioituvaan tuotantoon. Lisäksi tasapainotuskeinot ovat avainasemassa tehokkuuden maksimoimiseksi varioituvassa tuotannossa.

Yleisesti kehittämisprojekteissa tavoitteena voidaan pitää, että pyritään toiminnan tehostamiseen. Tämä oli myös NEAPON intresseissä. Koska aiemmissa projekteissa rakennusten valmistuskustannukset ovat olleet korkeat suhteessa myyntihintaan, pyritään tuotantokustannuksia pienentämään. Samalla ei kuitenkaan haluta tinkiä työn laadusta vaan pyritään kehittämään myös sitä. Tästä saadaankin ratkaisun yhdeksi kriteeriksi se, että moduulin tuotantokustannukset laskevat ja työn laatu paranee.

NEAPON moduulituotanto on aiemmin ollut hyvin projektiluontoista ja vaikka edellisiä kokemuksia hyödynnettiinkin jossain määrin, ei selkeitä toimintamalleja kuitenkaan vielä ollut muodostunut. Myös luvussa 3.7. on tehty johtopäätös, että projektisuuntautunut tuotanto saattaa hidastaa kehitystä. Niinpä yhtenä kriteerinä on, että ratkaisu tukee yhtenäisten toimintatapojen ja -mallien kehittämistä.

Tämän työn teoriassa ja sitä myötä luvun 3.7. painotusalueissa on tuotu esiin, kuinka moduulirakentamisessa tulisi keskittyä tuotantoprosessiin ja sen parantamiseen, ennen kuin pyritään korkeaan automatisoinnin tasoon. Myös aiemmissa moduulituotantohankkeissa on päädytty samaan lopputulokseen. Tämän perusteella kriteerinä on, että ratkaisu keskittyy ensisijaisesti moduulien kokoonpanoprosessin kehittämiseen ydinprosessin näkökulmasta.

Teoriassa tuodaan esiin myös se, että moduulituotannon ei välttämättä tarvitse olla pitkälle mekanisoitua ja automatisoitua. Lisäksi NEAPON intresseissä on, että parannusta pyritään aluksi tekemään pienin resurssein. Niinpä ratkaisun kriteeriksi voidaan määrittää sen keskittyminen, ainakin lyhyellä aikavälillä, perusasioihin, joiden kautta voidaan saada aikaa merkittäviä tuloksia ilman huomattavia investointeja. Tarkoitus on myös, ettei tuotantojärjestelmän toteuttaminen vaadi välittömiä suuria muutoksia tuotteeseen.

Edellisten perusteella voidaan johtaa yleisiä koko tuotantojärjestelmää koskevia kriteerejä, joiden tulee täytyä. Näitä ovat:

1. Läpäisy aika on pienempi kuin Espoon Kilo -projektissa.
2. Ratkaisu on joustava ja helposti muokattavissa olosuhteiden muuttuessa.

3. Moduulin kokoonpanokustannukset pienenevät ja työn laatu paranee.
4. Ratkaisu tukee yhtenäisten toimintatapojen ja -mallien kehittämistä.
5. Ratkaisun pääroolissa on ydinprosessien kehittäminen ja yksinkertaistaminen.
6. Ratkaisun tulee keskittyä aluksi perusasioihin, jotka eivät vaadi huomattavia investointeja.

Tarkennettujen kriteerien määrittelyssä pohjana ovat toimineet edellä esitetyt kriteerit, luvussa 3.7. esitetyt painotusalueet, luvussa 5.3. esitetyt Espoon Kilo -projektissa esiintyneet haasteet ja kokoonpanoprosessin kriittiset työvaiheet. Tulevaisuuden tavoitteena on, että pyritään ratkaisemaan mahdollisimman monia tuotannossa esiintyneitä ongelmia. Yhdessä NEAPOn edustajan kanssa on todettu, että tarkoituksenmukaista ratkaisun kannalta olisi, että pyritään ensin kehittämään lyhyellä tähtäimellä toteutettavissa oleva ratkaisu, jossa tuotannon kehittäminen aloitetaan niin sanotuista helpoista perusasioista. Tämän jälkeen voidaan pohtia pidemmän aikavälin ratkaisuja, joihin vaaditaan enemmän resursseja. Tarkennettujen kriteerien tehtävänä on toimia pohjana ratkaisuvaihtoehtojen paremmuuden vertailussa yleisten kriteerien täytyttyä.

Kriittisiksi työvaiheiksi on luettu moduulin rungon kasaaminen, kipsilevytys, kuivumisajat sekä moduulien nostot ja siirrot. Rungon kasaaminen ja kipsilevytys ovat rajoittavia tekijöitä, koska vievät paljon aikaa ja moduulin parissa työskentelevien työntekijöiden määrä on rajoitettu. Kuivumisajat taas ovat pakollista arvoa tuottamatonta aikaa ja moduulien nostot ja siirrot kasvattavat vaurioiden syntymisen riskiä.

Vakiintuneiden toimintamallien puuttuminen on ollut NEAPOn tuotannon yksi merkittävimpiä ongelmakohtia. Vakiintuneiden toimintamallien luonnin kannalta tärkeää on, että pystytään dokumentoimaan toimintatavat ja voidaan vertailla mikä on toiminut ja mikä ei. Koska alihankkijoiden määrä on suuri, eivät kaikki ole olleet välttämättä tekemisissä moduulituotannon kanssa aiemmin, olisi työohjeisiin myös panostettava nykyistä enemmän.

Arvoa tuottamattoman työn määrä on moduulituotannossa ollut hyvin merkittävä. Niinpä tuotantoprosessia tulee yksinkertaistaa ja tehostaa. Kuten aiemmin on jo todettu, alussa pyritään saamaan perusasiat kuntoon eli käytetään yksinkertaisia keinoja tuotannon tehostamiseen.

Ratkaisuvaihtoehdossa pyritään siihen, että aikataulut tehtäisiin alusta asti realistisiksi. Kuitenkin mahdollisiin muutoksiin tulisi reagoida nopeasti myös jatkon kannalta ja varmistaa, että aikataulusta tiedotetaan kaikille toimijoille.

Erikoisosaamisen vaatimukset ovat aiheuttaneet lisäkustannuksia ja läpäisyajojen pidentymistä. Aikaisemmin työvaiheet ovat olleet hyvin samanlaisia kuin perinteisessä rakentamisessa. Kuitenkin on todettu, että teollisen rakentamisen työvaiheet voivat ja niiden usein kannattaakin poiketa perinteisen rakentamisen työvaiheista.

Selkeän tuotannonohjauksen puuttuminen on ollut moduulituotannon hallintaa vaikeuttava tekijä. Tämä on muun muassa hidastanut tiedonkulkua tuotannossa, sekä tuotannon tilan tiedottamista yrityksen johdon ja asiakkaiden suuntaan.

Organisoitu varastohallinta on tärkeä osa tehokasta tuotantoa. Varastohallinta ja tehokas materiaalinjakelu vähentävät arvoa tuottamatonta aikaa ja selkeyttävät työntekijöiden tehtävänjakoa.

Jätteidenhallinta ei ole tämän työn keskeisimpiä tuotannon aihealueita. Kuitenkin jätteidenhallinnan kautta voidaan vaikuttaa materiaalikustannuksiin, tilantarpeeseen sekä tuotannon yleiseen selkeyteen.

Tarkennettujen kriteerien perusteella voidaan johtaa kysymyksiä, jotka on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. *Suunnittelussa apuna käytettävät kysymykset.*

• Kuinka sujuvia rungonkasausta- ja kipsilevytystyövaiheet ovat?
• Kuinka vähän kuivumisajat rajoittavat työskentelyä?
• Kuinka pieneksi pakollisten nostojen ja siirtojen lukumäärä on saatu?
• Kuinka mahdollistetaan toiminnan dokumentointi ja kehitys tulevaisuudessa?
• Kuinka helposti työohjeiden käyttöönotto voidaan toteuttaa?
• Kuinka suuren osan läpäisyajasta moduulissa tapahtuu arvoa lisäävää työtä?
• Kuinka hyvin on päästy eroon arvoa tuottamattomista siirroista ja odotusajoista?
• Kuinka hyvin ratkaisuvaihtoehto tukee tuottavan työympäristön ja -kulttuurin syntymistä?
• Kuinka helppoa on tuotannon aikataulutus?
• Kuinka paljon erikoisosaamista tarvitaan?
• Kuinka hyvin työvaiheiden kehittäminen on mahdollista tulevaisuudessa?
• Kuinka helppoa olisi integroida tuotannonohjausjärjestelmä?
• Mahdollistaako ratkaisuvaihtoehto merkintätapojen yhtenäistämisen sekä tiedonkulun parantamisen?
• Kuinka lyhyeksi materiaalien noutoon kuluva aika on saatu?
• Kuinka lähelle työasemia materiaalit saadaan toimitettua?
• Saadaanko jätevirtaa pienennettyä ja selkeytettyä?

Kysymyksiä voidaan käyttää apuna muun muassa ratkaisuvaihtoehtojen vertailussa.

6.2. Talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttävän layoutin suunnittelu tehtaalle

Tuotantojärjestelmän suunnittelun lähtökohdaksi on otettu, että tuotannosta pyritään tekemään virtaava. Tähän perusteluna on materiaalinkäsittelyyn kuluvan ajan pieneneminen ja tätä kautta tuottavuuden kasvu sekä kustannusten ja läpäisyajan pieneneminen. Esimerkiksi Heizer & Render (2013, s. 410) esittävät, että jatkuvan tuoteorientoituneen tuotannon etuja ovat kustannusten aleneminen standardoitujen tuotteiden myötä, alhaiset materiaalinkäsittelykustannukset, keskeneräisen tuotannon väheneminen, helpompi koulutus ja valvonta sekä nopea läpäisy. Sorri et al. (2013, s. 8) puolestaan havaitsivat tutkimuksissaan, että paikkakokoonpanoon perustuva toiminta moduulitehtaassa johti siihen, että moduulien virtaava asennus työmaalla ei aina onnistunut. Myös Smith (2010, s. 167) toteaa, että perinteisen rakentamisen tuominen sisätiloihin tuo kyllä jotain hyötyjä yritykselle, mutta todellisen teollisen, yhden kappaleen virtaan perustuvan tuotantojärjestelmän, implementoinnin jälkeen voidaan saavuttaa huomattavia parannuksia tehokkuudessa.

6.2.1. Perinteiseen kokoonpanolinjaan perustuva layout

Ensimmäinen layoutratkaisuvaihtoehto on perinteiseen tuotantolinjaan perustuva layout. Tämä tarkoittaa, että kaikki työvaiheet suoritetaan linjalla, ja moduulit liikkuvat tietyn tahtiajan mukaan. Kuten aiemmin on jo todettu, lähtökohtaisesti kysyntävauhtina moduulituotannossa käytetään yhtä työvuoroa eli seitsemää työtuntia. Luvussa 2.2.1 todetaan, että ideaalitulanteessa kysyntävauhti ja tahtiaika ovat lähes samat, joten tätä pidetään oletuksena laskuissa. Tässä vaihtoehdossa on yksinkertaistamisen vuoksi oletuksena, etteivät työntekijät liiku eri työasemien välillä.

Tuotantolinjalla työvaiheet pyritään jakamaan työasemille mahdollisimman tasaisesti. Taulukoissa 5 ja 6 on verrattu mallimoduulien A6 ja A14 läpäisyajoja, sekä yhdellä työasemalla tarvittavaa työntekijöiden lukumäärää riippuen työasemien lukumäärästä.

Taulukoiden 5 ja 6 perusteella nähdään, että työasemien määrän ollessa pieni, työntekijöiden määrä yhdellä asemalla kasvaa melko suureksi. Moduulien tilavuus, työvaiheiden keskinäiset riippuvuudet ja kuivumisajat rajoittavat kerralla työskentelemään pääsevien työntekijöiden määrää. Kerralla työskentelemään mahtuvien työntekijöiden määrää riippuu siitä voidaanko samaan aikaan toimia ulko- ja sisäpuolella tai märkä- ja kuivatilassa. Keskimäärin yhdessä moduulissa voidaan arvioida mahtuvan työskentelemään kerralla noin viisi työntekijää. Niinpä vaihtoehdot, joissa yhdellä työasemalla työskentelisi keskimäärin enemmän kuin viisi työntekijää kerrallaan rajataan pois. Tämä tarkoittaa käytännössä, että vaihtoehdot, joissa on kuusi tai kahdeksan työasemaa rajataan pois.

Toisaalta tuotantojärjestelmän tavoitteena oli lyhentää moduulien läpäisyaikaa, ja keskenäinen tuotanto vähentää tuotannon tehokkuutta sitomalla pääomaa. Lisäksi moduulien suuren koon vuoksi tarvittavan tehdastilan koko kasvaa, mikäli keskenäinen tuotanto on suurta. Niinpä läpäisyajaltaan yli kolme viikkoa kestävät vaihtoehdot rajataan pois. Jäljelle jäävät siis vaihtoehdot, joissa työasemien lukumäärä on 10, 12 tai 14. Vaihtoehdossa, jossa työasemien lukumäärä on 14 kasvaa työntekijöiden tarve huomattavasti suuremmaksi kuin muissa vaihtoehdoissa, mikäli valmistetaan moduuli tyyppiä A14. Niinpä jatkotarkasteluun valitaan vaihtoehdot, joissa työasemien lukumäärä on 10 tai 12. Näissä moduulin läpäisy aika pysyy kohtuullisena, ja lisäksi työasemilla keskimäärin tarvittavien työntekijöiden lukumäärä sellaisena, että tehokas työskentely on mahdollista. Huomioitavaa on, että mikäli työasemien lukumäärä olisi 12, työntekijöiden tarve per asema sekä yhteensä, säilyisi samana riippumatta moduulityypistä. Tämä on kuitenkin teoreettista tarkastelua ja luvussa 6.3. on tarkemmin eritelty työtehtävien ja -tekijöiden jakoa työasemien välillä.

Useat moduulikokoonpanon työvaiheet vaativat työn suorittamisen jälkeen kuivumisaikaa. Kuivumisaikat vaihtelevat muutamasta tunnista vuorokauteen, mikäli kuivumisolosuhteet ovat optimaaliset. Tämä voitaisiin linjamallissa huomioida niin, että kuivumisesta vaativat työvaiheet suoritetaan työvuoron lopussa, jolloin kuivumisaikaa olisi seuraavan vuoron alkamiseen asti eli noin 16 tuntia. Vuorokauden vaativia kuivumisaikoja on vain märkätiloissa tehtävissä työvaiheissa, ja tällöin märkätila voitaisiin rauhoittaa yhden työvuoron ajaksi.

Ylempänä on tarkasteltu linjan toimivuutta kun toimitaan yhdessä työvuorossa. Kuitenkin tarkoituksena on, että tulevaisuudessa on helppo siirtyä toimimaan kahdessa vuorossa kysynnän kasvaessa. Suurin yksittäinen ongelma kahteen vuoroon siirryttäessä olisi, että tällöin aamu- ja iltavuoron välissä ei olisi käytännössä lainkaan kuivumisaikaa, sekä lisäksi ilta- ja aamuvuoron välinen kuivumisaika lyhenisi kahdeksaan tuntiin. Tämä voitaisiin kuitenkin ratkaista sijoittamalla kokoonpanolinjan varteen välivarastoja kuivumisesta varten.

Perinteisestä kokoonpanolinjasta olisi myös mahdollista tehdä variaatio, jossa olisi kaksi linjaa rinnakkain. Tällöin moduuleja valmistuisi kysyntävauhdissa kaksi kappaletta. Tällöin kysyntäaikana olisi siis aluksi kaksi vuoroa, mikä tarkoittaisi läpäisyajan kaksinkertaistumista yksilinjaiseen vaihtoehtoon verrattuna. Tässä vaihtoehdossa kuitenkin kuivumisaikojen hallinta helpottuisi, sillä moduulit pysyisivät työasemalla pidempään. Myös moduulissa kerrallaan työskentelevien henkilöiden lukumäärä pienenis.

Kahdessa linjassa voitaisiin toimia myös niin, että yhdellä linjalla on vain viisi työasemaa, mutta moduuli kuitenkin pysyisi yhdellä työasemalla kaksi vuoroa. Näin yhden moduulin läpäisy aika olisi sama kuin yksilinjaisessa versiossa.

6.2.2. Osakokoonpanoihin perustuva layout

Moduulituotannossa olisi mahdollista siirtää suuriakin osakokonaisuuksia kokoonpantavaksi jo ennen pääkokoonpanoa. Tämän takia osakokoonpanoihin perustuva layout on yksi ratkaisuvaihtoehtoista. Osakokoonpanoihin perustuvassa layoutissa tuotantojärjestelmä koostuu pääkokoonpanolinjasta ja sen vieressä olevista osakokoonpanoista. Osakokoonpanoissa suoritettaisiin työvaiheita, joiden tuloksena on jokin moduuliin valmiina tai puolivalmiina kiinnitettävä osa. Nämä syötettäisiin sitten pääkokoonpanolinjalle. Osakokoonpanot toimisivat lähtökohtaisesti samassa tahdissa pääkokoonpanolinjan kanssa.

Benchmarking -kohteissa visuaalista ohjausta on onnistuneesti käytetty välineenä osakokoonpanojen ja pääkokoonpanolinjan väliseen synkronointiin. Täten myös moduulikokoonpanossa visuaalinen ohjaus olisi tärkeä ominaisuus osakokoonpanoihin perustuvassa layoutissa. Tämä saavutettaisiin sijoittamalla osakokoonpanot lähelle pääkokoonpanolinjaa, sekä sen aseman läheisyyteen, johon osakokoonpano syötetään.

Moduulikokoonpanon tasapainottaminen todennäköisesti helpottuisi, kun pitkäkestoiset työvaiheet siirrettäisiin pois pääkokoonpanolinjalta. Mahdollisia osakokoonpanona suoritettavia työvaiheita voisivat olla ensisijaisesti moduulin kasaaminen ja kattorakenteet. Lisäksi voitaisiin pohtia kuinka kiintokalusteet, talotekniset osakokonaisuudet ja tulevaisuudessa kokonaisten märkätilojen valmistus voitaisiin siirtää pääkokoonpanon ulkopuolelle.

Osakokoonpanoihin perustuvalla kokoonpanolinjalla kattorakenneosakokoonpanon sijoittaminen on tärkeässä roolissa. Kattorakenteen moduuliin asentamisen ajankohtaan vaikuttaa kattorakennetta edellyttävien työtehtävien ajoitus ja moduulin nostokestävyys. Moduuli on tukevampi nostaa, kun siinä on kattorakenne paikoillaan. Toisaalta materiaalien siirto moduulin sisään on helpompaa ennen kattorakenteen paikoilleen asentamista.

6.2.3. Työntekijöiden ja -välineiden virtauttamiseen perustuva layout

Työntekijöiden ja -välineiden virtauttamiseen perustuva layout olisi kehittyneempi versio moduulituotannon nykyisestä layoutista. Se olisi paikkakokoonpanoon perustuva layout, jossa on panostettu työntekijöiden ja työvälineiden tehokkaaseen liikkumiseen työpisteeltä toiselle. Vaihe aika olisi yksi vuoro. Tämä siis tarkoittaisi, että työmiehet ja välineet toimisivat yhden vuoron yhdellä pisteellä ja seuraavassa vuorossa siirtyisivät seuraavan moduulin kohdalle.

Layout poikkeaisi kuitenkin aiemmin moduulikokoonpanossa käytössä olleesta layoutista siten, että se olisi järjestelmällinen ja etukäteen päätetty. Tarkoitus olisi, että moduulit olisivat tiloissa työtehtävien mukaisessa suoritusjärjestyksessä. Tällöin myös työntekijöiden asema tietyn työvuoron aikana olisi kaikille selvä, eikä ristiinkulkemista

tapahtuisi. Työvaiheet voitaisiin suorittaa samassa järjestyksessä ja tahdissa kuin perinteisellä kokoonpanolinjalla. Työvuorojen määrän noustessa kahteen, toimenpiteet olisivat samat kuin kokoonpanolinjan kohdalla eli tiettyihin osuuksiin lisättäisiin välivarastoja.

Tämän layoutin toimivuuden kannalta tärkeä kysymys on, kuinka valmis moduuli kuljetetaan pois kokoonpanoalueelta. Tähän ratkaisuna voisi olla esimerkiksi, että kun yksi moduuli on valmis, se nostetaan kattonostimella muiden moduulien yli valmiin tuotannon alueelle. Toinen vaihtoehto on, että kokoonpanotilan layout on sellainen, että valmis moduuli voidaan kuljettaa esimerkiksi kuljetusvaunulla tai ilmatyynyalustalla lähtevien alueelle muiden moduulien ohi työvuoron päättyessä.

6.2.4. Linjakokoonpano, jossa myös rinnakkaisia asemia

Linjakokoonpano, jossa on rinnakkaisia asemia, sisältää linjakokoonpanolle ja toisaalta myös paikkakokoonpanolle tyypillisiä ominaisuuksia. Kokoonpanolinja haarautuu joissain osin useaksi työasemaksi, ja näissä moduulit voisivat olla useamman työvuoron ajan samoilla työasemilla. Näissä osuuksissa moduuleita voisi siis olla useampi samassa työvaiheessa jaksotetusti.

Tämäntyyppinen layout helpottaisi esimerkiksi paljon työtä vaativien työvaiheiden toteuttamista. Näiden suorittamisen aikana välttyttäisiin turhilta moduulin siirroilta. Lisäksi erikoistyöt voitaisiin sijoittaa tiettyyn paikkaan, jolloin työntekijät voisivat työstää useampaa moduulia yhden vuoron aikana. Rinnakkaisiin työpisteisiin voisi mahdollisesti helpommin sisällyttää myös kuivumisajat. Kokoonpanon tasapainottaminen myös todennäköisesti helpottuisi, kun vaiheajaltaan pitkäkestoiset työvaiheet voitaisiin suorittaa useamman työvuoron aikana ilman moduulin liikuttamista välillä. Mahdollisia rinnakkain suoritettavia työvaiheita voisivat olla moduulien kokoaminen, levytys, katon rakennus, märkätilojen kaakelointi tai osa taloteknisistä töistä.

6.3. Työasemien työtehtävien ja materiaalikäsittelyn organisointi

Työvaiheiden jako työasemille on ensin suoritettu perinteiselle kokoonpanolinjavaihtoehdolle, jonka jälkeen tehtyä työvaiheidenjakoa on sovellettu muihin ratkaisuvaihtoehtoihin. Tässä vaiheessa työtehtäviä organisoidessa on lähtökohtana ollut, että työasemat ovat suljettuja. Tämä tarkoittaa siis, että tietty työntekijä pysyy tietyllä työasemalla.

Perinteinen kokoonpanolinja

Tuotantolinjaa ja sen jakoa lähdettiin toteuttamaan työvaihekorttien ja työvaiheiden riippuvuuksien perusteella. Näiden ja vaiheaikatietojen perusteella tehtiin Gant kaavio

moduulituotantoprosessista (liite 10), mistä käy ilmi työvaiheiden mahdollisia suorittamisjärjestyksiä.

Tämän jälkeen tehtävät on jaettu karkeasti kymmenelle työasemalle. Tässä vaiheessa yksittäisiä työtehtäviä ei ole jaettu useammalle asemalle, lukuun ottamatta moduulien kasausta ja levytystä. Oletuksena on pidetty, että työntekijät ovat tietyllä työasemalla kiinteästi. Lisäksi työtehtävien jaossa on huomioitu työjärjestykset ja mitä tehtäviä voidaan suorittaa samanaikaisesti. Etenkin märkätiloissa suoritettavissa tehtävissä rajoitteena on pieni työskentelytila ja sisustustoissa suoritusjärjestys sekä työskentelytila. Esimerkiksi maalauksen ja tasoituksen kanssa samanaikaisesti ei moduulin kuivissa tiloissa voida suorittaa muita tehtäviä.

Rakentamisessa tarvitaan perinteisesti suuri määrä eri ammattilaisia ja näin on ollut myös moduulituotannossa. Tämän työn ratkaisuvaihtoehtoissa pyritään vähentämään tarvittavien ammattilaisten ryhmien määrää, jotta työn organisointi ja tasapainottaminen olisi helpompaa. Kokoonpanolinjaa ideoitaessa onkin ajateltu, että työntekijöitä on ammattitaitonsa mukaan kuusi ryhmää: sähkömiehet, putkimiehet, ilmastointimiehet, maalari/tasoittajat, rakennus/yleismiehet ja märkätiloihin erikoistuneet. Rakennus- ja yleismiehet ovat hyvin laaja ryhmä, mutta ajatus on että kyseiset työntekijät opastetaan ja koulutetaan asemakohtaisiin tehtäviin, eikä heidän ole tarkoitus osata kaikkia rakennusmiehelle nimettyjä tehtäviä.

Edellä kuvatun karkean jaottelun mukaisella tehtävänjaolla työntekijöiden tarve moduulin A6 valmistuksessa kymmenellä asemalla olisi 51 ja ne jakautuisivat työryhmien kesken taulukon 7 mukaisesti:

Taulukko 7. Työntekijöiden tarve työntekijäryhmittäin, moduuli A6 versio 1

Työntekijöiden tarve ryhmittäin	
Sähkömies	2
Putkimies	4
Ilmastointimies	4
Maalari/tasoittaja	2
Rakennus /yleismies	33
Kaakelointimies	6
Yhteensä	51

Ensimmäisen työtehtävien jaon jälkeen on työasemien tehtävänjakoa kehitetty A6 ja A12 moduuleille sekä 10 työaseman mallilla että 12 työaseman mallilla. Tehtävänjaot on esitetty liitteissä 14 ja 15. Taulukossa on esitetty asemittain niille sijoitettavat työvaiheet ja niihin kuluva vaiheaika. Työvaiheiden määrä ja vaiheaikojen summa on esitetty työvaiheiden alapuolella. Lisäksi taulukkoon on eritelty eri työntekijäryhmien työkuorma tunteina sekä henkilöiden tarve. Taulukossa on myös todettu työntekijöiden teoreettinen lukumääräinen tarve, joka on laskettu suoraan jakamalla vaiheaikojen summa tahtiajalla. Lisäksi eri työntekijäryhmiin kuuluvien työntekijöiden tarpeen avulla on las-

kettu työntekijöiden todellinen lukumääräinen tarve. Tässä tehtävänjaossa on pyritty tarkemmin huomioimaan eri ammattitaitoisten työntekijöiden jakaminen työasemille. Saman ryhmän töitä on mahdollisuuksien mukaan siirretty samoille asemille. Kuitenkin tätä tehtäessä havaittiin, että erikoistöitä suoritetaan lyhyitä aikoja kerrallaan, ja näitä on hankala saada sijoitettua optimaalisesti kokoonpanolinjan varteen. Esimerkiksi sähkömies tai putkimies saattaa pystyä suorittamaan työvaihetta yhdessä moduulissa vain puoli tuntia työvuoron aikana. Kokoonpanolinjan toisessa versiossa yksittäisiä työvaiheita on myös jaettu eri työasemille henkilöstötarpeen optimoimiseksi, kuitenkin huomioiden ettei pilkota työvaiheita liian pieniin osiin. Esimerkiksi lämpöeristystä on jaettu kahdelle työasemalle, jotta vierekkäisten asemien työmäärät tasoittuvat. Eri työntekijäryhmiä edustavien työntekijöiden tarvetta arvioitaessa on kahden viimeisen aseman kohdalla tehty pyöristys alaspäin, sillä on oletettu, että toiminnan tehostamisella työntekijöiden lukumäärän tarvetta voidaan pienentää 0,1 yksikköä.

Liitteiden 14 ja 15 mukaisella tehtävänjaolla työntekijöiden tarve moduulien A6 valmistuksessa olisi 46 ja A14 valmistuksessa 54, riippumatta onko asemien lukumäärä 10 vai 12, ja ne jakautuisivat työryhmien kesken taulukon 8 ja 9 mukaisesti:

Taulukko 8. Työntekijöiden tarve työntekijäryhmittäin, moduuli A6 versio 2

Työntekijöiden tarve ryhmittäin A6	10 asemaa	12 asemaa
Sähkömies	2	2
Putkimies	2	2
Ilmastointimies	3	3
Maalari/tasoittaja	2	2
Rakennus /yleismies	31	31
Kaakelointimies	6	6
Yhteensä	46	46

Taulukko 9. Työntekijöiden tarve työntekijäryhmittäin, moduuli A14 versio 2

Työntekijöiden tarve ryhmittäin A14	10 asemaa	12 asemaa
Sähkömies	2	2
Putkimies	3	3
Ilmastointimies	3	3
Maalari/tasoittaja	2	2
Rakennus /yleismies	37	37
Kaakelointimies	6	6
Yhteensä	53	53

Tämän perusteella huomataan, että työntekijöiden tarvetta on saatu pienennettyä työtehtävien jaon päivittämisellä. Kuitenkin edelleen joillain asemilla tietyillä työntekijäryhmillä, kuten sähkö- ja putkimiehillä, ei ole tehtävää koko työvuoron ajaksi.

Taulukosta 8 nähdään, että työntekijöiden lukumäärät pysyvät näillä tehtävänjaoilla samoina riippumatta onko käytössä kymmenen vai kahdentoista aseman kokoonpanolinja. Työasemien lukumäärän ollessa 12 kasvaa työasemakohtainen työntekijöiden työkuorma suhteellisesti.

Liitteestä 14 nähdään, että mikäli työasemia olisi tuotantolinjalla vain kymmenen, kasvaisi työntekijöiden määrä joillain asemilla liian suureksi. Esimerkiksi moduulin runkoa olisi kokoamassa samaan aikaan kuusi työntekijää, mikä todennäköisesti laskisi työtehoa. Kuten ylempänä mainitaan, työntekijöiden kokonaismäärä pysyy samana, vaikka työasemien määrän nostaa kahteentoista. Tämän takia perinteisestä kokoonpanolinjavaihtoehtosta käsitellään jatkossa vain versiota, jossa on kaksitoista työasemaa. Liitteessä 16 on esitetty kuva layoutista 12 työasemalla.

Kahden linjan versiossa voitaisiin tehtävien jako toteuttaa samalla tavalla kuin yksilinjaisessa versiossa. Erotuksena olisi, että kun moduuli pysyy yhdellä työasemalla kaksi vuoroa, voivat työntekijät jakaantua tekemään töitään kahdessa eri moduulissa. Työntekijöiden lukumäärä yhdellä asemalla teoriassa puolittuisi. Käytännössä kuitenkin ainakin erikoistyneet työntekijät toimisivat kahden eri linjan samoilla työasemilla. Liitteessä 17 on esitettynä hahmotelma kahden linjan kokoonpanojärjestelmästä.

Kahden linjan mallissa toisella linjalla voitaisiin valmistaa esimerkiksi A14 kaltaisia moduuleita ja toisella linjalla A6 kaltaisia moduuleita. Ratkaisuna olisi kaksi kuuden työaseman linjaa, jossa yksi työasema sisältäisi kahden aiemman version työaseman työvaiheet työstettäväksi kahdessa vuorossa. Tästä on esitetty työnjakomalli liitteessä 18.

Osakokoonpanoihin perustuva kokoonpanolinja

Osakokoonpanoihin perustuvalla linjalla tehtävänjako pääkokoonpanolinjalla voitaisiin järjestää pääosin samalla tavalla kuin perinteisellä kokoonpanolinjalla. Moduulin kasaaminen ja kattotyöt olisivat omina erillisinä osakokoonpanoinaan niiden suuren työmäärän vuoksi. Työvaiheiden jako menisi liitteen 19 mukaisesti. Liitteessä 20 on myös esitetty kokoonpanolinjan layout.

Myöhemmässä vaiheessa, kun LVI -putkitukset ja -johdotukset saadaan suunniteltua ja piirrettyä tarkasti jo ennen moduulien valmistamisen aloitusta, voitaisiin myös nämä tehdä erillisinä osakokoonpanoina. Esimerkiksi LVI -kuilu voitaisiin valmistaa kokonaan pääkokoonpanolinjan ulkopuolella. Tällöin osa putki- ja sähkömiesten töistä voitaisiin suorittaa keskeytyksettä osakokoonpanoasemalla. Layout kuvassa on piirrettynä myös LVI- kuilun osakokoonpanon optio.

Työntekijöiden virtauttaminen / paikkakokoonpano

Kuten luvussa 6.2.3 todettiin, työntekijöiden virtauttamiseen perustuvassa layoutissa tehtävienjako voisi olla samanlainen kuin kokoonpanolinjalla. Kuitenkin tässä mallissa voitaisiin enemmän työtä vaativat työvaiheet suorittaa niin, että samat työntekijät työskentelevät yhden moduulin parissa useamman työvuoron, jonka jälkeen siirtyvät moduulijonossa kyseisen määrän moduuleita eteenpäin. Tällöin siis useampi työryhmä suorittaa samaa työvaihetta eri moduuleissa samanaikaisesti. Esimerkiksi työläät rungon koonti ja levytys -työvaiheet suoritettaisiin näin, jolloin samat työntekijät voisivat suorittaa työvaiheen alusta loppuun tietyn moduulin kohdalla.

Käytännössä siis yhden moduulin rungon kasaaminen ja kipsilevytys suoritettaisiin useammassa vuorossa. Liitteessä 21 on esitetty tehtävienjako eri työryhmien välillä sekä liitteessä 22 layout työntekijöiden virtauttamiseen perustuvasta vaihtoehdosta. Kuten tehtävienjaosta nähdään, moduulin rungon kasausta suorittaisi porrastetusti kolme työryhmää, kukin työskennellen kolme työvuoroa yhdellä moduulipaikalla, ja kipsilevytystä vastaavasti kaksi työryhmää.

Moduulin valmistuttua se siirrettäisiin pois valmistuspaikaltaan kattonostimella tai moduulijonon-/ryhmän viertä pitkin ja tilalle tuotaisiin uuden moduulin rakenteet. Työntekijöiden mukana moduulilta toiselle kulkisi kuljetuskärry, jossa olisi työntekijäryhmän tarvitsemat työkalut sekä pienemmät työmateriaalit. Nämä siirrettäisiin työvuoron loputtua seuraavan moduulin kohdalle. Lisäksi isommat materiaalit siirrettäisiin moduulin kohdalle valmiiksi seuraavaa työvuoroa varten edellisen vuoron lopussa.

Rinnakkaisia asemia sisältävä kokoonpanolinja

Linjakokoonpanossa, jossa hyödynnetään myös rinnakkaisia asemia, voitaisiin hyödyntää linjamallin etuja, mutta toisaalta poistaa tuotantolinjan jäykkyyttä. Tässä mallissa kriittiset työvaiheet voitaisiin suorittaa rinnakkaisilla asemilla, jolloin välttyttäisiin turhilta siirroilta eri työvaiheiden välissä ja kuivumisajat olisi helpompi huomioida ilman turhia siirtoja esimerkiksi puskurivarastoihin.

Työvaiheet on jaettu työasemille käyttäen pohjana linjakokoonpanon ja osakokoonpanolinjojen tehtävienjakoa. Tästä on muokattu edelleen rinnakkaisia työvaiheita sisältävä versio, jossa työvaiheet on jaettu työasemille, huomioiden mitä työvaiheita voidaan suorittaa samanaikaisesti.

Liitteissä 23 ja 24 on esitetty rinnakkaisia asemia sisältävän kokoonpanolinjan tehtävienjako työasemien välillä ja layout. Kuten kuvasta nähdään, tässä versiossa moduulin rakenteiden kasaaminen, kipsilevytys sekä tasointi, kaakelointi ja maalaus on toteutettu rinnakkaisina työasemina. Lisäksi kattorakenteiden valmistus on siirretty päälinjalta osakokoonpanoksi (liite 25).

Materiaalinjakelun organisointi

Materiaalinjakelun organisoinnissa voitaisiin hyödyntää benchmarking -käynneillä tehtyjä havaintoja. Benchmarking -kohteissa materiaalinjakelu oli pyritty yksinkertaistamaan ja suurien ja kalliiden materiaalien tilaus ja linjalle syöttö tekemään tilausten mukaan ohjautuvaksi.

Kehitetyissä ratkaisuvaihtoehtoissa materiaalinjakelu tapahtuu aluksi mahdollisille osakokoonpanopisteille, joista kokoonpanot siirtyvät päälinjalle. Pääkokoonpanolinjan työasemilla tarvittavat materiaalit toimitetaan suoraan työasemille. Lisäksi kaikilla työasemilla on valmiina tarvittavat työkalut ja kiinnitysmateriaalit.

Materiaalit tuodaan työasemille siinä muodossa, etteivät ne vaadi valmisteluja. Käytännössä tämä tarkoittaa, että materiaalit ovat määrämittaisena ja kuljetuspakkaukset poistettuina. Lisäksi esimerkiksi talotekniikan osat voidaan esikoota ennen työasemalle tuontia. Näin vähennetään asennustyöntekijöiden materiaalinkäsittelyyn kuluva aikaa ja tehostetaan itse kokoonpanoa

Työtehtävien ja materiaalinjakelun organisoinnin vaihtoehtojen vertailu

Taulukossa 10 on esitetty eri ratkaisuvaihtoehtojen läpäisyajat ja tarvittavien työntekijöiden määrä.

Taulukko 10. Työntekijöiden lukumäärät ja läpäisyajat ennen tasapainotusta

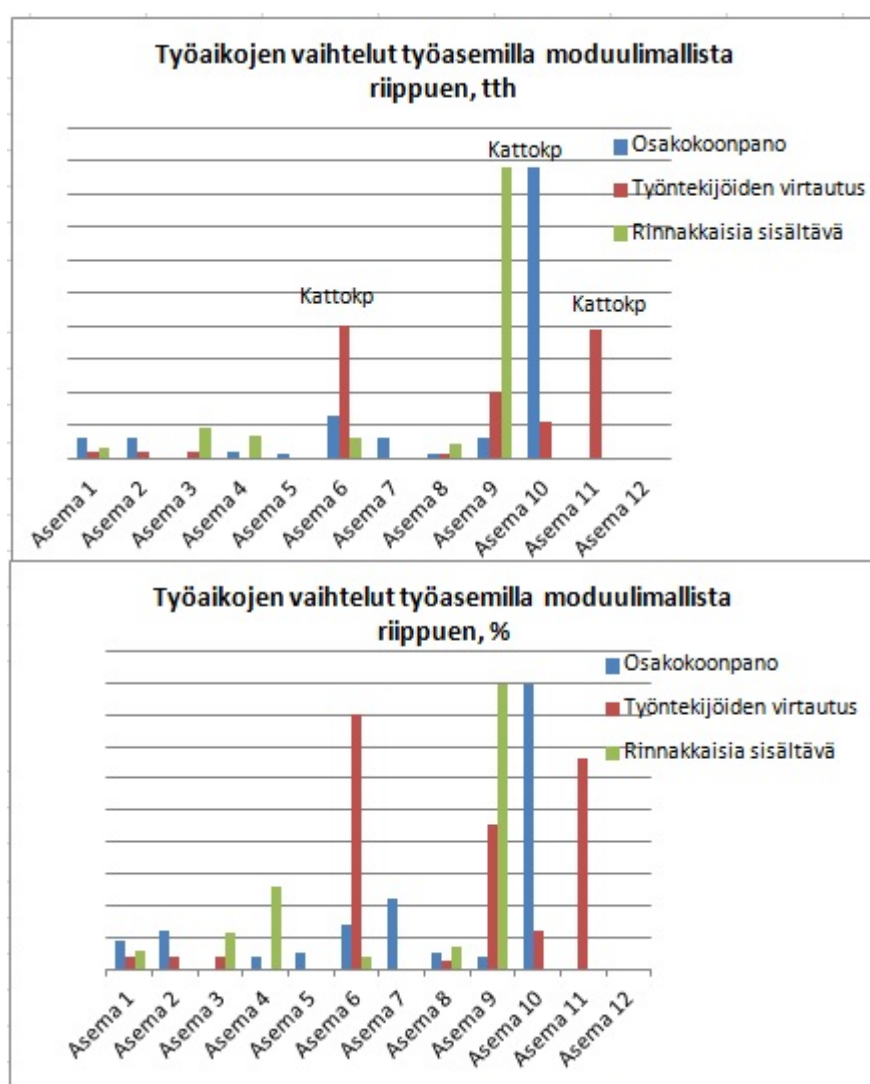
Kokoonpanolinja		2 linjaa rinnakkain		Osakokoonpanolinja		Työntekijöiden virtaus		Rinnakkaisia työasemia sisältävä	
Työntekijät	53 kpl	Työntekijät	58 kpl	Työntekijät	52 kpl	Työntekijät	56 kpl	Työntekijät	52 kpl
Läpäisy aika	12 vuoroa	Läpäisy aika	12 vuoroa	Läpäisy aika	11 vuoroa	Läpäisy aika	12 vuoroa	Läpäisy aika	14 vuoroa

Perinteisessä kokoonpanolinjavaihtoehdossa yhdellä työasemalla työskentelevien työntekijöiden määrää kasvaa yksittäisillä työasemilla melko suureksi työtehtäviin nähden. Tämä havaitaan etenkin rakenteidenkasaus-, levytys- ja kaakelointityövaiheiden kanssa. Nämä työvaiheet vievät paljon aikaa, ja vaatisivat useampia työntekijöitä, mutta samaan aikaan yhdessä moduulissa työskentelevien työntekijöiden lukumäärä on rajattu tilanpuutteen takia. Toisaalta jos taas työläitä työvaiheita jaetaan edelleen useammille työasemille, siirtojen ja materiaalinjakelun tarve, läpäisy aika sekä koko linjan tilantarve suurenevät.

Perinteinen kokoonpanolinja ja sen suorat variaatiot ovat myös hyvin jäykkiä ja häiriöherkkiä. Kun kaikki työ tapahtuu samalla linjalla vaikuttavat suunnittelemattomat muutokset ja tuotteiden variaatiot koko tuotantoon hyvin helposti. Tämän takia tässä vaiheessa todetaan, että jätetään pois perinteinen linjavaihtoehto ja sen variaatiot jatkotarkastelusta.

6.4. Moduulikokoonpanon tasapainotus ja aikataulutus

Kuvassa 10 on esitetty laskennalliset työaikojen vaihtelut työasemilla tuotevariaatiosta johtuen eri ratkaisuvaihtoehdoilla. Ensin on laskettu jokaisen ratkaisuvaihtoehdon kohdalla sekä moduulimallin A6 että A14 vaiheaikojen summa työntekijätunteina asemittain. Ylempään kuvaajaan on merkattu näiden summien erotus asemittain. Kuvaajasta siis nähdään kuinka paljon työkuorma asemalla muuttuu sen mukaan valmistetaanko moduulia A6 vai A14. Alemmassa kuvaajassa on esitetty summien erotus prosentteina verrattuna A14 vaiheaikojen summaan. Kuvassa on nimetty kattokokoonpanoa sisältävät työasemat, sillä kattorakenteen teko on mallimoduulien kohdalla ollut merkittävin työvaiheiden muutoksia aiheuttava tekijä. Muut vaihtelut ovat lähinnä moduulien työskentelypinta-alojen erojen aiheuttamia vaihteluja.



Kuva 10. Tuotevariaation aiheuttama työaikojen vaihtelu työasemilla.

Kuten kuvasta 10 nähdään, laskelmissa käytettävien mallimoduulien koko ei aiheuta kovin merkittäviä vaihteluita vaiheajoissa. Suurin osa vaihteluista ei vaikuta tarvittavien

työntekijöiden määrään. Suuremmat vaihtelut vaihe aikoihin tulevat tiettyjen työvaiheiden, lähinnä kattorakenteen, suorittamisesta vain tietyille moduuleille. Taulukossa 11 on esitetty hukka-aika ja tasapainotushukka jokaisen ratkaisuvaihtoehdon kohdalla ennen tasapainotusta. Laskelmissa on käytetty luvussa 2.2.1. esitettyjä kaavoja. Kokonaisstandardiaikana on käytetty moduulin A14 valmistukseen kuluva aikaa, sillä halutaan kuvata tasapainotushukkaa, joka syntyy työasemien välisestä työaikojen vaihtelusta ja erikoisosaajien tarpeesta.

Taulukko 11. Hukka-aika ja tasapainotushukka ennen tasapainotusta.

Tasapainotushukka tasapainotusta ennen					
kokonaisstandardi aika					
	Kokoonpanolinja	Kaksi linjaa rinnakkain	Osakokoonpanoihin perustuva kokoonpanolinja	Työntekijöiden virtauttamiseen perustuva kokoonpanolinja	Rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja
jaksonaika					
työntekijät (kpl)					
jaksonaika					
työntekijät (kpl)					
Hukka-aika					
Tehokkuus	%	%	%	%	%
Tasapainotushukka	%	%	%	%	%

Taulukosta 11 nähdään, että linjalla on huomattavasti hukka-aikaa. Erilaisten ammattimiesten tarve ja työasemien välinen epätasapaino aiheuttaa vaihtelua ja hankaluuksia moduulikokoonpanon tasapainottamiseen. Tässä luvussa käsitellään, kuinka työasemien välistä työkuormaa saadaan tasattua ja näin vähennettyä hukka-aikaa ja tarvittavien työntekijöiden kokonaismäärää.

Moduulikokoonpanon tulevaisuudessa on kuitenkin odotettavissa suurempia vaihteluita niin moduulien kokoon kuin tarvittaviin työvaiheisiin, joten tässä luvussa on pohdittu myös erilaisia keinoja tasapainottaa linjaa tietyn työvaiheen keston, suoritettavien työvaiheiden ja työntekijöiden tarvittavan erikoisosaamisen sekä tietenkin kysynnän vaihtelun mukaan.

Työasemien välisen tehtävänjaon ja tuotevariaation tasapainotuskeinoja

Työasemien välisten työaikavaihtelujen tasoittaminen: työasemien välillä olevia eroja työajoissa voidaan tasapainottaa jakamalla työvaiheita uusiksi kokonaisuuksiksi tai pienemmiksi osiksi. Kuten luvussa 2.3.4. on esitetty, tasapainotuksen tarkoituksena on jakaa työ mahdollisimman tasaisesti eri työasemien välille.

Tasapainottaminen siirtämällä työntekijöitä asemien välillä: työntekijöiden liikuttamisella työasemien välillä voidaan reagoida muutoksiin, jotka liittyvät moduulien kokoon tai sisällytettäviin työvaiheisiin. Lisäksi näin voitaisiin tasata erikoisosaajien tarvetta koko tuotannossa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tietyt työntekijät eivät pysyisi yhdellä työasemalla eivätkä noudattaisi tahtiaikaa.

Työntekijöiden liikuttaminen työasemien välillä vaatii sen, että työntekijät on koulutettu useisiin eri työtehtäviin. Lisäksi työntekijöiden liikuttamiseen tulee olla ennalta laaditut säännöt tai vaihtoehtoisesti liikuttaminen voi tapahtua työnjohdon toimesta.

Tarkasteltavien vaihtoehtojen kohdalla työntekijöiden tasapainottaminen asemien välillä on suoritettu niin, että työasemilla, joilla yhdellä työntekijällä on tehtävänänsä alle 3,5 työntekijätuntia vuorossa, on tutkittu voitaisiinko työntekijä jakaa jonkin toisen aseman kanssa. Käytännössä siis mikäli esimerkiksi sähkömiehelle on työtä vain 3 tuntia vuorossa, on tarkastettu olisiko muilla asemilla sähkömiehelle töitä 4 tai vähemmän tuntia vuorossa. Mikäli näin on, yhdistettiin asemille yksi yhteinen sähkömies kahden sijaan.

Jatkossa moduulivariaatioiden määrän kasvaessa työntekijöiden siirrolla voidaan tasapainottaa myös työtehtävien määrän ja keston vaihteluista johtuvia epätasapainoja.

Tasapainottaminen käyttämällä erikoisille tuotteille omaa paikkakokoonpanoa: valitun ratkaisuvaihtoehdon rinnalla voisi olla erikoisille tuotteille tai yksittäistilauksille suunnattu paikkakokoonpano, jossa vaihtelevat moduulit valmistetaan ilman päälinjan häiriintymistä. Tällä keinoilla voitaisiin reagoida yksittäisiin erilaisiin tilauksiin, mutta ei varsinaisesti pysyviin tuotevariaatioihin.

Tasapainottaminen puskureiden avulla: tuotantolinjan tasapainottaminen puskurivarastojen avulla on mahdollista linjamaaisessa ratkaisussa. Tämä sopii parhaiten erikokoisten moduulien valmistuksen tasapainottamiseen. Kuitenkin puskurivarastot lisäävät kesken eräisen tuotannon määrää ja ne lisäävät myös moduulien siirtojen tai työntekijöiden liikkumisen määrää. Kuten luvussa 2.3.4. todetaan, puskureina voidaan käyttää myös työntekijöitä tai työkoneita.

Tasapainottaminen lisätyöpisteiden avulla: moduulikokoonpanoon voitaisiin myös sijoittaa lisätyöpisteitä, joissa voitaisiin suorittaa tiettyä tai vaihtelevaa työvaihetta. Nämä voisivat toimia lisätyöpisteinä ruuhkautuvalle työasemille tai vaihtoehtoisesti vain tiettyille moduuleille suoritettavien työvaiheiden toteutuspaikkana. Lisätyöpisteet lisäävät tilantarvetta ja todennäköisesti myös lisäävät moduulien siirtojen määrää, mutta toisaalta voivat yksinkertaistaa päälinjan toimintaa. Rinnakkaisia työasemia sisältävä vaihtoehto hyödyntää jo tätä keinoa.

Tasapainotus valmistusjärjestyksen suunnittelulla: varioituvien tuotteiden kohdalla tasapainotus voidaan järjestää niin, että tuotteiden valmistusjärjestyksessä huomioidaan niihin kuluvat työajat. Käytännössä voitaisiin esimerkiksi valmistaa suuren moduulin jälkeen pieni moduuli, jolloin työntekijöiden liikuttamista hyödyntämällä saataisiin koko tuotantoprosessin virta ylläpidettyä tasaisena, kun suuremman moduulin lisätyöt voitaisiin tasata pienemmän moduulin valmistamisesta ylijäävällä kapasiteetilla.

Kokoonpanolinjan tasapainotuksessa tulee huomioida, että lopullinen ratkaisu kehittyy vasta käytännön kokeilujen kautta ja suunnitteluvaiheessa toteutettu tasapainotus toimii

lähtökohtana kehitykselle. Lisäksi on tärkeää tiedostaa, että kokoonpanolinjan ollessa täysin tasapainossa, pienetkin häiriöt yhdellä työasemalla voivat viivästyttävät muiden asemien toimintaa ja näin koko tuotantoa. Tämän takia onkin tehty johtopäätös, että pieni epätasapaino tulee tuotannossa säilyttää joustavuuden takaamiseksi.

Osakokoonpanoihin perustuva kokoonpanolinja

Osakokoonpanoihin perustuvalla kokoonpanolinjalla voitaisiin tasapainotuksen keinoista hyödyntää oikeastaan kaikkia keinoja. Tutkimuksessa havainnointikohteena käytetys- sä projektissa katto tarvittiin joka toiseen moduuliin. Kattorakenteiden teko siis aiheutti ongelmia tasapainotukseen. Kuitenkin siirtämällä katto osakokoonpanoksi voitaisiin vastaavanlaisessa tapauksessa valmistus järjestää niin, että katto-osakokoonpanossa vain toisella asemalla työskenneltäisiin kerrallaan, koska katto tulisi vain joka toiseen moduuliin. Katon paikoilleen asettamisessa tarvitaan enemmän työvoimaa kuin alapohjan tiivistyksissä. Samoin kattorakenteen teossa menee vähemmän aikaa kuin villoituksessa ja viimeistelyssä. Silloin voitaisiin liikuttaa työntekijöitä pääkokoonpanon aseman 2 ja katto-osakokoonpanon välillä. Kuvassa 11 on esitetty kuinka moduuli liikkuu työasemi- en välillä ja kuinka osakokoonpanot on synkronoitu pääkokoonpanolinjaan. Liitteissä 25 ja 26 on esitetty tarkemmin tehtävänjako osakokoonpanoissa.

A6= katoton, A14= katollinen	Vuoro 1	Vuoro 2	Vuoro 3	Vuoro 4	Vuoro 5	Vuoro 6	Vuoro 7	Vuoro 8	Vuoro 9	Vuoro 10	Vuoro 11
Moduulin koonti	A6-1 / A14-1 / A6	A14-1 / A6 / A14	A6 / A14 / A6+1	A14 / A6+1 / A14+1	A6+1 / A14+1 / A6+2	A14+1 / A6+2	A6+2				
Kattorakenteet 1		A14-1		A14		A14+1					
Kattorakenteet 2			A14-1		A14		A14+1				
Pääkokoonpano 1		A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1	A14+1	A6+2			
Pääkokoonpano 2			A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1	A14+1	A6+2		
Pääkokoonpano 3				A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1	A14+1	A6+2	
Pääkokoonpano 4					A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1	A14+1	A6+2
Pääkokoonpano 5						A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1	A14+1
Pääkokoonpano 6							A6-1	A14-1	A6	A14	A6+1
Pääkokoonpano 7								A6-1	A14-1	A6	A14
Pääkokoonpano 8									A6-1	A14-1	A6

Kuva 11. Osakokoonpanoon perustuva kokoonpanolinja tasapainotettuna.

Osakokoonpanolinjan kohdalla suoritettiin myös työasemien välinen työntekijöiden tasapainottaminen tämän luvun alussa esitetyllä tavalla kokonaistyöntekijämäärän pienentämiseksi. Tasapainotuksen tuloksena työntekijämäärää saatiin pienennettyä 52 työntekijästä 47 työntekijään. Yhdistetyt tehtävät on esitetty liitteessä 27.

Työntekijöiden virtauttamiseen perustuva kokoonpanolinja

Tässä ratkaisuvaihtoehdossa voitaisiin hyödyntää edellä esitetyistä tasapainotuksen keinoista työntekijöiden siirtelyä. Kun työntekijöiden liikkuminen on jo valmiiksi virtautettu, voisi työntekijöiden siirto tapahtua helpommin moduulityypin mukaan. Lisäksi erillinen paikkakokoonpano vaativampia tuotteita varten olisi tulevaisuudessa mahdollista. Moduulien erojen aiheuttamia vaihteluita työajoissa voisi tasata myös tässä vaihtoehdossa puskurivarastojen avulla.

Työntekijöiden virtautukseen perustuvan kokoonpanolinjan kohdalla suoritettiin myös työasemien välinen työntekijöiden tasapainottaminen tämän luvun alussa esitetyllä tavalla kokonaistyöntekijämäärän pienentämiseksi. Tasapainotuksen tuloksena työntekijämäärää saatiin pienennettyä 56 työntekijästä 48 työntekijään. Yhdistetyt tehtävät on esitetty liitteessä 27. Mahdollista olisi myös eriyttää talotekniikan erikoistyöntekijät muista työntekijöistä, ja he liikkuisivat täysin omaan tahtiin moduulien välillä. Tämä sen takia, että talotekniikan töitä suoritetaan usein vain korkeintaan muutama tunti kerrallaan.

Linjakokoonpano, jossa myös rinnakkaisia asemia

Rinnakkaisia asemia sisältävän kokoonpanolinjan kohdalla työasemien välisen työkuorman ja moduulien variaation aiheuttamien vaihteluiden tasaamiseen voitaisiin käyttää myös kaikkia luvun alussa esitettyjä keinoja. Työasemien asettaminen rinnakkain tasaa jo itsessään vaihteluita, sillä moduulit viipyvät useamman vuoron ja työvaiheen ajan samassa paikassa, ja rinnakkaisten työasemien välillä työntekijöiden liikuttaminen on helppoa.

Myös tässä mallissa kattokokoonpano on toteutettu päälinjan ulkopuolisena osakokoonpanona. Tämä tasaa suurimman yksittäisen työvaiheen aiheuttamia vaihteluita tuotannossa. Osakokoonpanoon perustuvan ratkaisun yhteydessä esitetty malli soveltuu myös tähän ratkaisuvaihtoehtoon kattorakenteiden osalta.

Rinnakkaisia työasemia sisältävän kokoonpanolinjan kohdalla suoritettiin myös työasemien välinen työntekijöiden tasapainottaminen luvun alussa esitetyllä tavalla kokonaistyöntekijämäärän pienentämiseksi. Tasapainotuksen tuloksena työntekijämäärää saatiin pienennettyä 52 työntekijästä 47 työntekijään. Yhdistetyt tehtävät on esitetty liitteessä 27.

Yhteenveto

Eri vaihtoehtoissa tarvittava työntekijämäärä tasapainotuksen jälkeen on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Työntekijöiden lukumäärät ja läpäisyajat tasapainotuksen jälkeen.

<u>Osakokoonpanolinja</u>		<u>Työntekijöiden virtaus</u>		<u>Rinnakkaisia työasemia sisältävä</u>	
Työntekijät	47 kpl	Työntekijät	48 kpl	Työntekijät	47 kpl
Läpäisy aika	11 vuoroa	Läpäisy aika	12 vuoroa	Läpäisy aika	14 vuoroa

Taulukossa 13 on esitetty ratkaisuvaihtoehtojen hukka-aika ja tasapainotushukka tasapainotuksen jälkeen. Liitteessä 28 on myös esitetty asemakohtaisesti työntekijöiden kuormitus ennen ja jälkeen tasapainotuksen.

Hukka-aikojen ja tasapainotushukan vertailuissa on käytetty lähteenä mallimoduuli A14:ta, sillä sen tuoterakenne ja valmistusprosessi on monimutkainen. Kuten taulukosta 13 nähdään, tasapainotushukkaa on saatu pienennettyä huomattavasti jo työasemien avoimuuden lisäämisellä.

Taulukko 13. Hukka-aika ja tasapainotushukka tasapainotuksen jälkeen.

Tasapainotushukka tasapainotuksen jälkeen			
kokonaisstandardi aika			
	Osakokoonpanoihin perustuva kokoonpanolinja	Työntekijöiden virtauttamiseen perustuva kokoonpanolinja	Rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja
jaksonaika			
työntekijät (kpl)			
jaksonaika			
työntekijät (kpl)			
Hukka-aika			
Tehokkuus	%	%	%
Tasapainotushukka	%	%	%

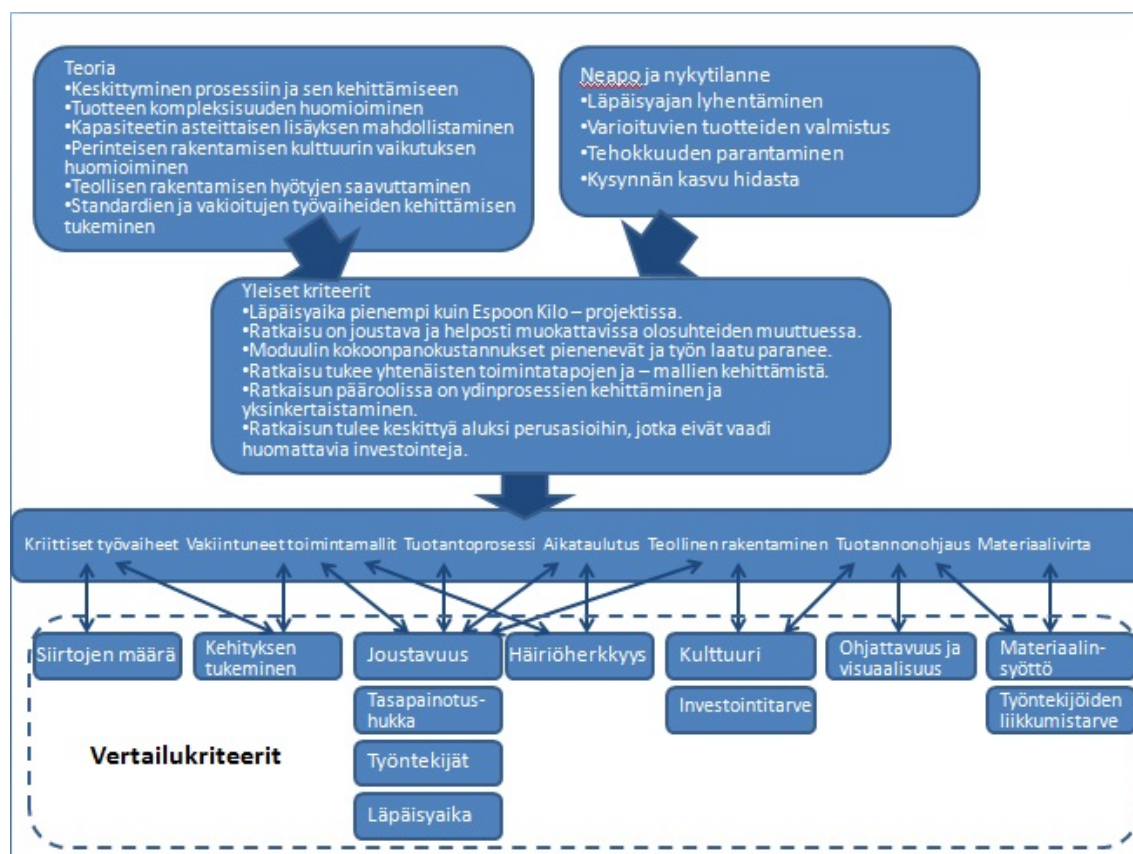
Tässä vaiheessa suunnitteluprosessia on käytetty tasapainotuskeinona asemien välisen työkuorman tasaamiseksi työasemien avaamista. Näin voidaan hyödyntää työntekijöiden jakamista asemien välillä ja vähentää esimerkiksi sähkö- ja putkimiesten tarvetta sillä he voivat nyt suorittaa yhden työvuoron aikana tehtäviä useammalla asemalla. Tämä asettaa toki lisähaasteita tuotannon organisointiin ja edellytyksenä onkin, että liikuvien työntekijöiden reitit on määritetty tarkasti etukäteen. Muut tasapainotuskeinot ovat sellaisia, että niitä tulee soveltaa tuotantojärjestelmän implementoinnin yhteydessä ja sen jälkeen. Tuotevariaation aiheuttamien heilahtelujen tasaamista tulee suorittaa tuotevariaation kasvaessa tässä luvussa mainituin keinoin.

6.5. Vaihtoehtojen vertailu

Luvussa 6.1.3. on esitetty seuraavat yleiset kriteerit, jotka ratkaisuehdotuksen tulee täyttää:

1. Läpäisy aika on pienempi kuin Espoon Kilo -projektissa.
2. Ratkaisu on joustava ja helposti muokattavissa olosuhteiden muuttuessa.
3. Moduulin kokoonpanokustannukset pienenevät ja työn laatu paranee.
4. Ratkaisu tukee yhtenäisten toimintatapojen ja -mallien kehittämistä.
5. Ratkaisun pääroolissa on ydinprosessien kehittäminen ja yksinkertaistaminen.
6. Ratkaisun tulee keskittyä aluksi perusasioihin, jotka eivät vaadi huomattavia investointeja.

Nämä kriteerit ovat toimineet lähtökohtana ratkaisuvaihtoehtojen luomisessa ja voidaan todeta, että kaikkien ratkaisuvaihtoehtojen kohdalla kriteerit täyttyvät. Esimerkiksi kriteerit yksi ja kolme täyttyvät, sillä arvoa tuottamatonta aikaa saadaan ratkaisujen avulla pienennettyä, jota kautta läpäisy aika lyhenee ja työntekijöiden työteho paranee. Vakioitu layout ja tehtävienjako taas tukevat kriteerin neljä toteutumista. Ratkaisuvaihtoehtoissa on keskitytty työvaiheiden virtauttamiseen ja koko virran yksinkertaistamiseen perusasioiden kautta, jonka perusteella myös kriteerit viisi ja kuusi täyttyvät. Tuotantjärjestelmäsuunnitelmat on luotu sellaisiksi, että niitä voi muokata kapasiteetin mukaan, joten ne ovat myös joustavia ja muokattavissa. Kuitenkin vaihtoehtoja tulee vertailla keskenään, jotta niiden paremmuusjärjestys saadaan selville. Luvussa 6.1.3 on esitelty tarkennettuja kriteerialueita ja kysymyksiä, joiden perusteella voidaan vertailla ratkaisuvaihtoehtoja. Näistä on johdettu vaihtoehtojen vertailussa käytettävät vertailukriteerit. Kuvassa 12. on esitetty vertailussa käytettävät kriteerit ja niiden lähteet.



Kuva 12. Ratkaisuvaihtoehtojen vertailussa käytettävät kriteerit.

Kehitettyjen ratkaisuvaihtoehtojen vertailu on toteutettu painotetun pisteytyksen avulla. Pisteytettäessä käytettävät vertailukriteerit on jaettu numeerisiin kriteereihin, joille voidaan antaa numeerinen arvo ja subjektiivisiin kriteereihin, jotka on pisteytetty. Numeeristen arvojen kohdalla kriteerit on pisteytetty niin, että parhaan numeerisen arvon omaava vaihtoehto saa kolme pistettä, toiseksi paras kaksi ja kolmas yhden. Subjektii-visten arvojen kohdalla jokaisen kriteerin kohdalla on tehty arvio vaihtoehtojen välillä ja tämän perusteella annettu pisteitä -3, -2, -1, 0, 1, 2 tai 3. Kriteerit on myös painotettu

niiden merkittävyyden mukaan, huomioiden tämänhetkiset olosuhteet ja tavoitteet. Pistedenanto- ja painotusperusteet on esitetty kriteerikohtaisesti seuraavassa.

Läpäisyajalla viitataan eri ratkaisuvaihtoehtojen mukaisiin moduulin tuotannon läpäisy-aikoihin, jotka on esitetty luvussa 6.4. Läpäisy aika ei ole tärkeimpiä kriteerejä vaihtoehtojen vertailussa, sillä jokainen ratkaisuvaihtoehto lyhentää läpäisy aikaa huomattavasti entisestään. Kuitenkin läpäisy aika kuvaa samalla myös keskeneräisen tuotannon määrää, joten sille annetaan painoarvoksi 0,2. Työntekijöiden lukumäärä tarkoittaa tuotannossa työasemilla tarvittavien työntekijöiden määrää. Myös työntekijöiden lukumäärät on esitetty luvussa 6.4. Työntekijöiden lukumäärä vaikuttaa tuotannon kustannuksiin. Työntekijöiden lukumäärän painotusarvo on 0,2. Tasapainotushukan käsite on määritelty luvussa 2.2.1. Tasapainotushukalla voidaan kuvata työntekijöiden ja työasemien hyödyntämistä ja on siksi tärkeä luku kuvaamaan prosessin tehokkuutta. Tasapainotushukan painotusarvo on 0,4. Moduulin siirrot ja nostot on määritelty tuotantoprosessin kriittisiksi vaiheiksi. Tämä perustuu riskeihin, joita esiintyy nostojen yhteydessä (laatuvirheiden syntyminen ja vahinkoriski) sekä nosto- ja siirtokapasiteetin tarpeen kasvuun kertojen lisääntyessä. Moduulin siirtojen määrän painotusarvo on 0,2.

Ensimmäinen subjektiivinen kriteeri on joustavuus. Tuotantojärjestelmän joustavuudella viitataan tuotantojärjestelmän joustavuuteen kapasiteetti-, tuote- tai prosessimuutosten yhteydessä. Joustavuus on yksi tärkeimmistä kriteereistä tuotantojärjestelmälle ja sen painoarvo on 0,35. Joustavuuden suhteen ratkaisuvaihtoehtoista positiivisesti nousee esiin rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja, sillä se sisältää rinnakkaisia työasemia, joissa toimitaan tiimimäisesti. Tämä mahdollistaa tuotevariaatioiden aiheuttamien vaihteluiden tasaamisen kyseisillä asemilla. Lisäksi vaihtoehto suosii työntekijöiden monitaitoisuutta, ja siinä työasemat on sijoitettu lähekkäin, mitkä asiat tukevat joustavuuden saavuttamista. Myös muut vaihtoehdot sisältävät tiimimäistä toimintaa, mutta prosessimuutokset saattavat työntekijöiden virtauttamiseen perustuvan vaihtoehdon kohdalla vaatia suuria toimenpiteitä.

Materiaalinjakelun tarkoitus on mahdollistaa linjalla työskentelevien työntekijöiden keskittyminen kokoonpanotyöhön. Materiaalinjakelu on myös määritelty yhdeksi tärkeimmistä kriteereistä ja sen painotusarvo on 0,35. Materiaalinjakelun kohdalla negatiivisessa mielessä nousee esiin työntekijöiden virtauttamiseen perustuva vaihtoehto, sillä se vaatisi monimutkaisen materiaalinjakelukeinon tai huomattavaa panostusta kokoonpanotyöntekijöiltä, sillä tiettyjä materiaaleja tarvitaan vuorotellen kaikilla asemilla. Osakokoonpanoihin perustuvan ja rinnakkaisia työasemia sisältävän vaihtoehdon materiaalinjakelun mahdollisuuksissa ei ole suuria eroja.

Tuotantojärjestelmän häiriöherkkyydellä viitataan mahdollisten ei-suunniteltujen tapahtumien vaikutusta tuotantojärjestelmän toimintaan. Hyvä tuotantojärjestelmä kestää pienet odottamattomat vaihtelut ilman näkyvää muutosta sen tuotantokykyyn. Häiriöherkkyys on tämän takia nimetty myös yhdeksi tärkeimmistä kriteereistä ja sen painoarvo on

0,35. Todellista häiriöherkkyyttä on hankala arvioida ennen käytäntöön soveltamista. Kuitenkin voidaan arvioida, että häiriöherkkyydelle altistaa esimerkiksi lähes täysin tasapainotettu tuotanto sekä työntekijöiden liikkumista vaativa toiminta. Tämän perusteella voidaan todeta työntekijöiden virtauttamiseen perustuvan kokoonpanolinjan olevan häiriöherkkä. Osakokoonpanojen suuri määrä saattaa altistaa synkronointiongelmille, mitkä taas lisää häiriöherkkyyttä. Toisaalta myös moduulien liikkutuksen tarve saattaa lisätä häiriöherkkyyttä. Häiriöherkkyyttä taas vähentää tiimimäinen toiminta, jossa vaihteluja voidaan tasata ja näin pienentää niiden vaikutuksia.

Kehityksen tukeminen tarkoittaa vakiintuneiden työmenetelmien, teollisen talotuo-
tannon prosessin ja uusien teknologioiden kehityksen tukemista. Tuo-
tantojärjestelmä voi tukea näitä esimerkiksi mahdollistamalla virheiden havainnoinnin, olemalla muuntautumisky-
kyinen ja tukemalla työmenetelmien vakiointia. Kehityksen tukemisen painotusarvo on 0,25. Työntekijöiden virtauttamiseen perustuvan tuotantojärjestelmän ei voida sanoa olevan kovin muuntautumiskykyinen. Lisäksi se voi peittää virheitä työntekijöiden liik-
kuessa kokoonpanopaikalta toiselle. Osakokoonpanolinja ja rinnakkaisia työasemia si-
sältävä kokoonpanolinja taas tukevat työtehtävien vakiointia, kun työtehtävät suori-
ta-
taan tietyssä paikassa. Lisäksi varsinkin rinnakkaisia työasemia sisältävä linja on muun-
tautumiskykyinen esimerkiksi rinnakkaisia linjoja sisältäväksi järjestelmäksi.

Tuotantojärjestelmän investointitarve on vaihtoehtojen vertailussa oleellinen kriteeri. Tavoitteena oli, että pyritäisiin parantamaan tehokkuutta keskittymällä perusasioihin suurien investointien sijaan. Investointitarpeen painotusarvo kriteerinä on 0,25. Mikään kehitetyistä ratkaisuvaihtoehdoista ei vaadi kovin merkittäviä investointeja verrattuna aikaisempaan tuotantoon. Suurimmat investoinnin kohdistuvat moduulien siirto- ja nos-
tojärjestelmään, jonka takia työntekijöiden virtauttamiseen perustuvan kokoonpanolin-
jan investointikustannukset olisivat pienimmät. Myös materiaalinjakelujärjestelmä saat-
taa vaatia joitain investointeja.

Työntekijöiden liikkumistarve vähentää kokoonpanoon käytettävän ajan määrää. Työn-
tekijöiden liikkumistarvetta painotetaan kertoimella 0,1. Työntekijöiden virtauttamiseen perustuvassa vaihtoehdossa työntekijöiden liikkumisen tarve on suuri, vaikkakin pie-
nempi kuin aiemmin. Myös kahdessa muussa ratkaisuvaihtoehdossa työntekijöiden tu-
lee liikkua silloin kun työasemien välisen vaihtelun tasapainottaminen sitä vaatii, ja mi-
käli moduulien siirtämisessä tarvitaan työvoimaa. Muuten näissä vaihtoehdoissa työnt-
ekijöiden liikkumista on saatu pienennettyä huomattavasti.

Ohjattavuus ja visuaalisuus ovat tärkeitä tekijöitä tuotannonohjauksen kannalta. Ohjat-
tavuudella viitataan tuotannon kontrolloinnin helppouteen myös muuttuvien olosuhteiden mukaan. Tähän liittyy myös esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmän integroimi-
nen. Visuaalisuudella taas viitataan tuotannon ja sen tapahtumien seurannan helppou-
teen ja toisaalta myös työasemien välisen toimintojen ohjaamiseen. Ohjattavuuden ja visuaalisuuden painotusarvo on 0,15. Virtaava tuotanto parantaa usein tuotannon ohjat-

tavuutta ja visuaalisuutta. Lisäksi tiettyjen työvaiheiden tapahtuessa tietyllä paikalla ohjattavuus ja visuaalisuus paranevat. Tämän takia osakokoonpanoon ja rinnakkaisia työasemia sisältävään linjaan perustuvat vaihtoehdot nousevat työntekijöiden virtauttamisen edelle tässä kriteerissä. Taulukkoon 14 on koottu ratkaisuvaihtoehtojen saamat pisteet kriteereittäin sekä niiden yhteenlasketut pisteet.

Taulukko 14. Ratkaisuvaihtoehtojen vertailu.

<u>Numeeriset kriteerit</u>	Osakokoonpanoihin perustuva kokoonpanolinja	Työntekijöiden virtauttamiseen perustuva kokoonpanolinja	Rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja
Läpäisy aika (pv)	11	12	14
pisteet	3	2	1
painotus	0,2	0,2	0,2
Työntekijät (kpl)	47	48	47
pisteet	3	2	3
painotus	0,2	0,2	0,2
Tasapainotushukka			
pisteet	2	3	2
painotus	0,4	0,4	0,4
Moduulin siirtojen määrä	9	2	8
pisteet	1	3	2
painotus	0,2	0,2	0,2
Numeeriset yhteensä	2,2	2,6	2
Numeeriset painotus	1		
<u>Subjektiiiviset kriteerit</u>			
Joustavuus	2	1	3
painotus	0,35	0,35	0,35
Materiaalinsyöttö	2	-3	2
painotus	0,35	0,35	0,35
Häiriöherkkyy	0	-1	1
painotus	0,35	0,35	0,35
Kehityksen tukeminen	2	-2	3
painotus	0,25	0,25	0,25
Investointitarve	1	3	1
painotus	0,25	0,25	0,25
Työntekijöiden liikkumistarve	1	-2	1
painotus	0,1	0,2	0,2
Ohjattavuus ja visuaalisuus	2	0	2
painotus	0,15	0,15	0,15
Kulttuuri	3	2	3
painotus	0,2	0,1	0,1
Subjektiiiviset yhteensä	3,15	-1	3,9
Subjektiiiviset painotus	2		
Yhteensä	5,35	1,6	5,9

Perinteisen rakentamisen kulttuurin vaikutuksen huomioonottaminen siirryttäessä teolliseen talotuohtantoprosessiin on hyvin tärkeää, kuten jo aiemmin on useasti tuotu ilmi. Tämän kriteerin painotusarvo on 0,2. Yleisesti todettiin jo aiemmin, että perinteisen rakentamisen kulttuurin painolastista tulisi pyrkiä eroon. Linjamainen virtaava tuotanto edistää tätä. Kaikki ratkaisuvaihtoehdot kuitenkin huomioivat sen, että muutosten tulee

tapahtua vaiheittain, jotta työntekijät saadaan vakuutettua uusien menetelmien toivuudesta.

Numeeristen kriteerien yhteispainotusmäärä on yksi ja subjektiivisten kriteerien painotusmäärä yhteensä kaksi. Lisäksi subjektiivisten kriteerien kohdalla käytössä oleva pisteskaala on laajempi. Subjektiivisten kriteerien suurempi painoarvo selittyy sekä kriteerien suurempana lukumääränä, että numeeristen arvojen muutosherkkyydellä. Ratkaisussa on kyse tuotantojärjestelmästä, joka ei ole yksityiskohtaisesti suunniteltu. Numeeriset kriteerit kuvaavat tuotantojärjestelmän mahdollista suorituskykyä ja ovat suuntaa antavia, sillä todellisia tuotannossa toteutuvia lukumääriä on hankala ennustaa tarkasti, ja osa kehityksestä tapahtuu joka tapauksessa implementoinnin yhteydessä. Subjektiiviset kriteerit kuvaavat tuotantojärjestelmän ominaisuuksia yleisemmällä tasolla ja ovat pysyvämpiä implementoinnin läpi.

Taulukosta 14 nähdään, että numeeristen kriteerien perusteella työntekijöiden virtauttamiseen perustuva kokoonpanolinja ja subjektiivisten kriteerien perusteella rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja saivat eniten pisteitä. Yhteispisteissä rinnakkaisia työasemia sisältävä vaihtoehto sai eniten pisteitä.

7. EHDOTUS MODUULITUOTANTOON SOPIVASTA TUOTANTOJÄRJESTELMÄSTÄ

Vaihtoehtojen vertailemiseksi suoritettujen pisteytyksien mukaan suositeltava ratkaisuvaihtoehto tuotantojärjestelmäksi on rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja. Vaihtoehdon etuja ovat sen myötä saavutettava virtaava tuotanto, järjestelmän joustavuus, materiaalinjakelun yksinkertaistaminen, teollisen talotuosantoprosessin kehityksen tukeminen, visuaalisuus ja perinteisen rakentamisen kulttuurin vaikutuksen huomioiminen.

7.1. Ehdotettu tuotantojärjestelmä

Varioituvan rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmän tulee olla ominaisuuksiltaan ennen kaikkea joustava. Lisäksi sen tulee keskittyä ydinprosesseihin, olla lähtökohdiltaan virtaava ja kehittyä jatkuvasti asiakkaiden tuotemieltyymysten mukaan.

Tässä diplomityössä kehitetty rinnakkaisia työasemia sisältävä kokoonpanolinja täyttää nämä vaatimukset. Layoutin osalta ehdotetaan ratkaisua, joka perustuu siis kokoonpanolinjaan, jossa on myös rinnakkaisia työasemia vaativille työvaiheille. Linja koostuu kahdeksasta asemasta, joista kolme on jaettu rinnakkaisiin pisteisiin. Lisäksi layoutissa on suunniteltuna erillinen katto-osakokoonpano, jossa mahdolliset kattorakenteet valmistetaan. Layout on esitetty kuvassa 13.

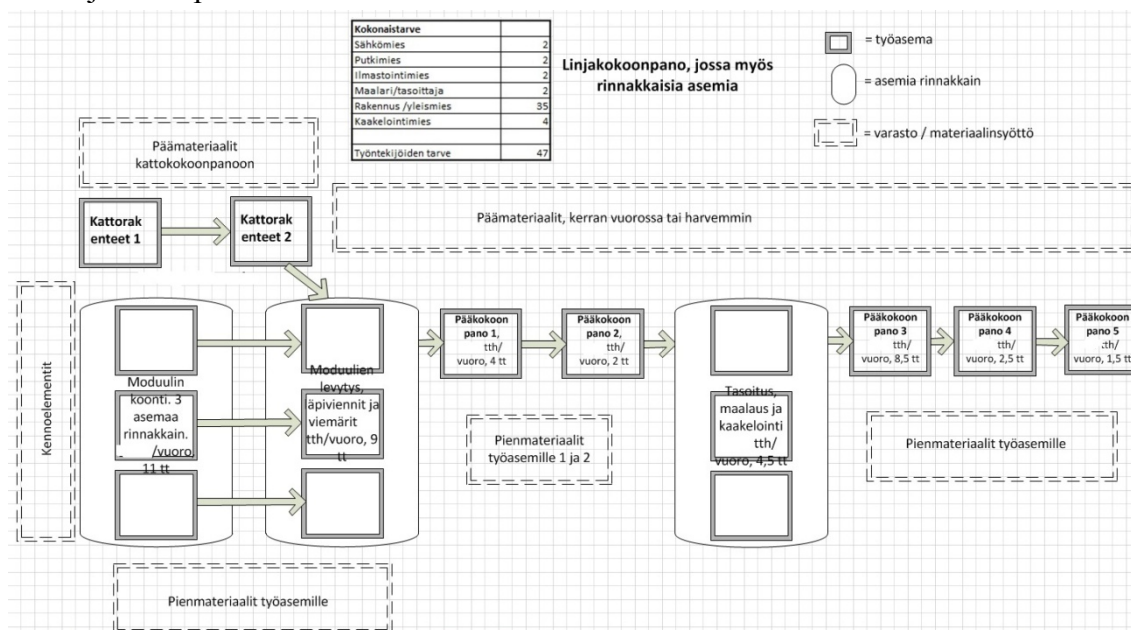
Työasemien tehtävänjako on suoritettu huomioimalla työvaiheiden keskinäiset riippuvuudet ja työskentelytilan riittävyys. Tehtävänjaon pääajatuksena on, että työntekijät on tässä vaiheessa tuotantoprosessin kehitystä vielä jaettu osaamisensa mukaan kuuteen ryhmään, joita ovat putkimiehet, sähkömiehet, ilmastointimiehet, pintakäsittelijät (maalari/tasoittaja), yleismiehet sekä märkätilaosajaajat. Kehityssuuntana on, että aluksi pyritään laajentamaan yleismiesten osaamista myös muihin kuin omiin työvaiheisiin. Jatkossa myös talotekniikan ja muut erikoisosaamista vaativat työvaiheet tulee järjestellä niin, että työaseman sisällä kaikki pystyvät tekemään kaikkia töitä. Työvaiheet on jaettu työasemittain ja jokaiselle työasemalle on määritetty eri työntekijäryhmistä tarvittavien työntekijöiden lukumäärä. Työaseman sisällä työnjakoa ei ole tehty vaan tarkoitus on, että työasemakohtaisesti työntekijät toimivat tiiminä.

Työasemille toimitettavat materiaalit jaetaan kahteen ryhmään, niin sanottuihin päämateriaaleihin ja pienmateriaaleihin. Päämateriaalit ovat kooltaan ja hinnaltaan suurempia ja niitä tarvitaan vain tietyissä työvaiheissa, kun taas pienmateriaalit ovat hinnaltaan ja kooltaan pienempiä tiivistys-, kiinnitys- ja yleismateriaaleja. Päämateriaalit tuodaan

työasemille pienissä erissä tai jopa vuorokohtaisesti. Pienmateriaaleja taas on työaseman yhteydessä suurempi määrä ja niiden toimitus tapahtuu noudattaen esimerkiksi kanban -menetelmää. Moduulien liikuttaminen voidaan järjestää rullallisten laverien päällä tai ilmatyynykuljettimilla. Tarvittavat moduulien nostot taas voidaan suorittaa joko katto tai pilarinostimilla.

Moduulikokoonpanon tasapainotuskeinoina käytetään työasemien avoimuutta, tiimi-mäistä toimintaa ja erilaisten moduulimallien valmistusta sekajärjestyksessä. Rinnakkaiset työasemat tasaavat jo itsestään vaihtelua, koska niillä suoritetaan pitkiä ja vaihtelevankestoisia työvaiheita. Lisäksi moduulivariaation kasvaessa voidaan ottaa käyttöön tarvittaessa puskurivarastoja tai -työpisteitä tai jopa erillinen vaativien moduulien paikakokoonpanoasema.

Tuotantojärjestelmän vaatima tehdastila määräytyy moduulien halutun maksimikoon mukaan. Moduulien leveys on kuljetussyistä rajattu seitsemään metriin. Moduulin pituuden maksimirajaa ei ole määritetty. Työasemilla, joissa ei suoriteta moduulin ulkopuolisia töitä, voidaan moduulin ympärille laskea puoli metriä työskentelytilaa, jolloin kahden moduulin etäisyys on vähintään yksi metri. Työasemilla, joissa taas suoritetaan ulkotöitä ja saatetaan tarvita nosturia, lasketaan 1,5 metriä työskentelytilaa. Tämä tila on puhdasta työskentelytilaa eikä sisällä materiaali- ja työkaluvarastoja. Mikäli moduulien maksimipituus olisi 12 metriä, kuten Hernesaassa valmistettujen moduulien tapauksessa, tulisi tuotantolinjalle varata 30 x 112 metriä. Lisäksi kattokokoonpanoa varten tarvittaisiin 10 x 30 metrin alue kokoonpanolinjan alkupään vierestä. Mikäli sopivankokoista tuotantohallia ei löydy, voidaan layoutia tarvittaessa muokata hieman. Kuvassa 13 on esitetty tasapainotettu rinnakkaisia työasemia sisältävän kokoonpanolinjan layout materiaalinjakelupisteineen. Moduulien valmisvarasto voidaan sijoittaa esimerkiksi tehdastilojen ulkopuolelle.



Kuva 13. Ehdotus rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmäksi.

Kuva on myös esitetty suurempana liitteessä 29. Liitteessä 30 on esitetty työnjako tasapainotuksen jälkeen. Lisäksi havainnoinnin aikana nousi esiin muita asioita, joita tulee kehittää, jotta tuotantojärjestelmän käyttöönotosta saadaan maksimaalinen hyöty. Näitä ovat esimerkiksi vakiintuneiden työmenetelmien kehittäminen esimerkiksi työohjeiden avulla; tuotannon tiedotuksen keskittäminen tiettyyn paikkaan ja erikoisosaamisen riippuvuuden pienentäminen.

7.2. Moduulikokoonpanon tulevaisuus

Edellä on esitetty lyhyen aikavälin toimenpidesuosituksia. Kuitenkin tarkoitus on tulevaisuudessa jatkaa rakennusmoduulituotannon kehittämistä ja tehostamista. Tässä luvussa onkin esitetty jatkokehitysideoita moduulituotantoon ja myös visio rinnakkaisia työasemia sisältävän kokoonpanolinjan kehityssuunnasta.

7.2.1. Rakennusmoduulituotantoprosessin kehittäminen

Työvaiheita joissa esivalmistusasteen korottamista voidaan pohtia, ovat:

1. Seinärakenteet, esim. kipsilevytyt vaakatasossa tai sähköjohtojen asennus ennen kokoamista
2. Lattiarakenne, esim. viemärit ja vesiputket ennen kokoamista
3. Kiintokalusteiden kokoaminen ennen moduuliin vientiä
4. Kylpyhuoneen esivalmistus kokonaisuutena
5. Keittiöratkaisun esivalmistus
6. Kattorakenne
7. Alimman kerroksen pohjaeristeet

Moduulien siirtotekniikka on avainasemassa tuotannon virtauksen toteuttamisessa ja häiriöherkkyyden muotoutumisessa. Siirtotekniikkaa tuleekin kehittää niin, että työntekijöiden moduulien siirtämiseen kuluva aika minimoidaan. Ilmatyynyalustat ovat helppo tapa liikuttaa moduuleja, sillä niiden avulla liikuttelu on tilan salliessa vapaata ja moduulia voidaan myös kääntää paikoillaan. Ilmatyynyalustojen käyttöönotossa lattiapinnan tulee olla tasainen ja se on pidettävä siistinä.

Tulevaisuudessa rakennusmoduulien tuotantoprosessia voidaan pyrkiä yksinkertaistamaan työmenetelmien kehittämisellä. Kehittämisessä huomioidaan tuotteen funktio, eikä ollenkaan sitä, kuinka tietyt työvaiheet on aikaisemmin tehty. Tätä kautta voidaan löytää aivan uusia ja tehokkaita menetelmiä työvaiheiden toteutukseen. Esimerkkejä uusista työmenetelmistä on esimerkiksi, moduulin katon kiinnittäminen paikoilleen vasta prosessin loppupuolella, jolloin osakokoonpanoja voitaisiin nostaa moduuliin sisään. Tällöin moduulin kokoaminen voisi tapahtua vasta prosessin myöhemmässä vaiheessa. Lisäksi työvaiheita tulee kehittää niin, ettei olisi tarvetta erikoisosaajille, mihin voitaisiin pyrkiä yksinkertaistamalla ja vakioimalla työvaiheita ja toisaalta kouluttamalla

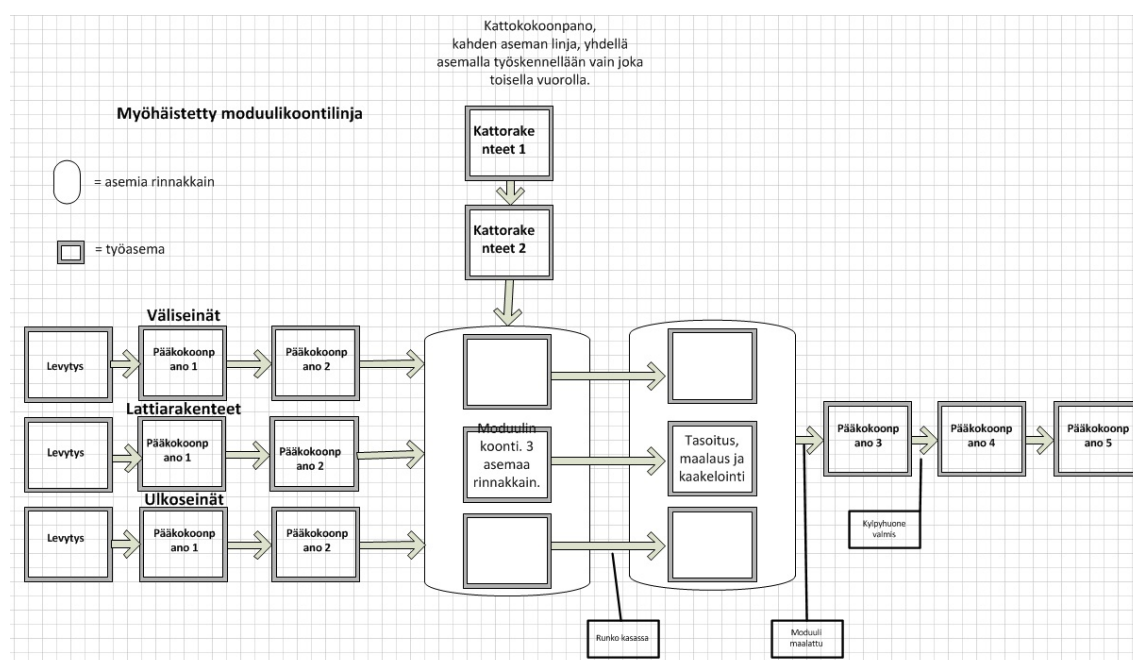
työntekijöitä työasema kerrallaan. Näin esimerkiksi tasapainottaminen helpottuisi huomattavasti.

Paljon normaalista poikkeavien moduulitilausten kohdalla voitaisiin tulevaisuudessa ottaa käyttöön erillinen työasema, jossa kyseiset moduulit valmistettaisiin. Tällaisen aseman käyttöönoton myötä voitaisiin myös lisätä valmistettavien talojen yleisten tilojen tehdasvalmistusta. Työasemalla voisi olla tietty määrä sille osoitettuja työntekijöitä ja lisäksi se voisi hyödyntää kokoonpanolinjalla vapaina olevia työntekijöitä.

7.2.2. Moduulin myöhäistetty koonti

Moduulin kokoonpano voi tapahtua myös niin, että seinäelementtien esivalmistusastetta ennen koontia kasvatetaan integroimalla niihin enemmän ominaisuuksia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että moduulin seinärakenteet voitaisiin esimerkiksi levyttää ja aukottaa jo ennen moduulin kokoonpanoa. Kyseinen tuotantolinjavaihtoehto vaatisi kuitenkin etenkin talotekniikan osalta suunnitelmien tarkkuuden lisääntymistä sekä tiettyjen työvaiheiden ja työmenetelmien muuttamista. Tällöin erittäin tärkeään rooliin kokoonpanon sujuvuuden kannalta nousisivat seinäelementtien väliset liitokset.

Kuvassa 14 on luonnosteltu moduulin myöhäistettyyn koontiin perustuvaa kokoonpanolinjaa. Sama kuva on esitetty liitteessä 31 tarkempaan. Liitteessä 32 on luonnosteltu mahdollista tehtävänjakoa asemien kesken. Nämä mallit on kehitetty käyttäen pohjana rinnakkaisia työasemia sisältävää kokoonpanolinjaa. Tehtävien jako ja layout ovat hyvin samankaltaisia, ja moduulin myöhäistetty koonti voisi toimia luonnollisena kehitysaskeleena rinnakkaisia työasemia sisältävälle kokoonpanolinjalle.

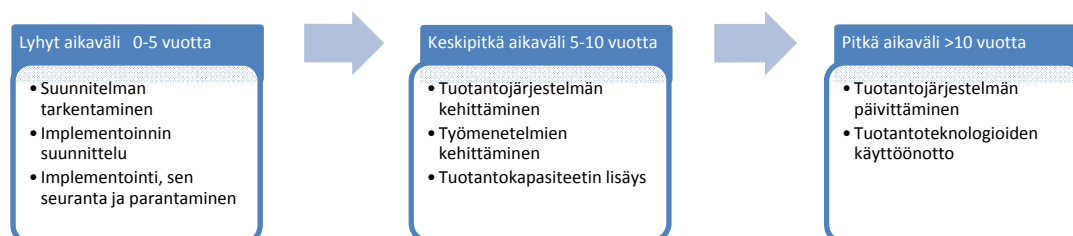


Kuva 14. Moduulin myöhäistettyyn kokoonpanoon perustuva kokoonpanolinja.

Mallissa ennen moduulin koontia työt voitaisiin suorittaa rinnakkaisilla linjoilla, kuten kuvassa 14 on esitetty, tai vaihtoehtoisesti mixed-model -tyyppisellä linjalla. Paloeristeiden asentaminen ennen moduulin koontia tarkoittaisi, että seinärakenne pitäisi kääntää jossain vaiheessa työskentelyä. Tähän voitaisiin mahdollisesti hyödyntää käännettävää työskentelytasoa. Seinärakenteita olisi mahdollista työstää myös solutyypisessä ratkaisussa ennen kokoonpanoa. Kokoonpanon jälkeen moduuli siirtyisi kulkemaan linjamaisesti tuotannossa eteenpäin.

7.3. Toimenpide-ehdotukset

Tuotantojärjestelmän käyttöönotossa on tärkeää, että yrityksen eri toiminnoista vastaavat henkilöt osallistuvat sen suunnitteluun. Näin voidaan varmistaa, että yrityksen eri toiminnot tukevat tuotantoa ja päinvastoin. Käyttöönottoa edeltää suunnitelmien tarkentaminen ja käyttöönoton edellytysten tunnistaminen sekä toteuttaminen. Käytännössä suunnitteluvaiheessa tulee tarkentaa esimerkiksi työasemien ja varastojen sijoittelua käyttöön tulevan tehdastilan mukaan. Lisäksi työntekijöiden hankinta tulee suunnitella ja suorittaa jako työasemille. Suunnitelman implementoinnin yhteydessä on tärkeää tiedottaa kaikkia asianosaisia ja järjestää tarvittavia koulutuksia. Lisäksi tulee jatkuvasti seurata tehtyjä muutoksia ja niiden vaikutuksia, sekä myös reagoida niihin. Suunnitelmia on mahdotonta tehdä täysin valmiiksi, joten yksityiskohtien hiominen tapahtuu implementoinnin yhteydessä. Kun tuotantojärjestelmä saadaan käyttöön, seurataan sitä tiiviisti ja tehdään parannuksia käytännön kokemusten perusteella. Kuvassa 15 on esitetty ehdotus aikataulusta, jolla lyhyen ja pitkän aikavälin toimenpiteitä voisi toteuttaa.



Kuva 15. Toimenpiteiden toteutusaikataulu.

Keskipitkän aikavälin toimenpiteet keskittyvät tuotantojärjestelmän ja työmenetelmien edelleen kehittämiseen. Tavoitteena kehityksessä tulisi olla tuottavuuden parantaminen ja tuotevariaation kasvun mahdollistaminen. Lisäksi kysynnän kasvaessa tulee tuotantokapasiteettia mahdollisesti lisätä. Ensisijaisena keinona tähän tulee käyttää tuottavuuden parantamista tuotantoprosessin ja -menetelmien tehostamisen keinoin. Kuitenkin voidaan myös ottaa käyttöön toinen työvuoro. Pitkällä aikavälillä taas tuotantojärjestelmää tulee päivittää vastaamaan uusia työmenetelmiä, esimerkiksi luvussa 7.2.2. esitetyn moduulin myöhäistettyyn koontiin perustuvan kokoonpanolinjan kaltaiseksi. Tuotannon perusasioiden ollessa kunnossa ja investointikyvyn noustessa, voidaan myös ottaa käyttöön erilaisia tuotantoteknologioita parantamaan tuottavuutta.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tuloksena kohdeyritykselle luotiin moduulikokoonpanoon soveltuva tuotantojärjestelmä. Tässä luvussa on esitetty tutkimuksen johtopäätökset. Luvussa on käsitelty suositukset liikkeenjohdolle, tutkimusten tulosten arviointi, tutkimuksen aikana tehdyt tieteelliset havainnot sekä huomiot tutkimuksesta ja jatkotutkimuskohteet.

8.1. Suositukset liikkeenjohdolle

Luvussa 7 on esitetty suositeltava ratkaisuehdotus moduulikokoonpanon tuotantojärjestelmäksi. Suositeltavan ratkaisuehdotuksen pääpiirteitä ovat moduulien virtaus, työvaiheiden ja niiden suorituspaikkojen vakiointi sekä selkeä materiaalinjakelu. Suositeltavat toimenpiteet ratkaisun käyttöönottamiseksi voidaan jakaa kolmeen osaan:

1. Valmistelu ja tuotantojärjestelmän käyttöönotto
2. Tuotantojärjestelmän seuranta ja kehittäminen
3. Tuotantojärjestelmän päivittäminen ja tuotantoteknologioiden käyttöönotto

Tuotantojärjestelmän käyttöönoton valmistelu on tärkeä edellytys järjestelmän käyttöönotolle. Kun edellytykset ovat kunnossa, voidaan ratkaisua alkaa toteuttaa. Käyttöönoton jälkeen vasta jatkuvan seurannan ja kehittämisen kautta voidaan päästä tavoitteet täyttävään ratkaisuun. Kun tuote ja työvaiheet kehittyvät, voidaan pitkällä aikavälillä siirtyä päivitetyn tuotantojärjestelmän ja -teknologioiden käyttöönottoon.

Kehitetyn tuotantojärjestelmän seurauksena moduulituotannon läpimenoaikoja saataisiin lyhennettyä, kustannuksia pienennettyä ja laatua parannettua tuotannon virtauksen ja työvaiheiden vakioinnin kautta. Tämä kuitenkin vaatii yritykseltä resursseja ja sitoutumista tuotannon kehittämiseen. Juuri sitoutumisen puute ja epärealistiset odotukset vaikuttaisivat olevan osasyyn joidenkin teollisen rakentamisen hankkeiden epäonnistumiseen. (kts. Luku 3.7) Suuret muutokset vaativat aikaa.

8.2. Tulosten arviointi

Tämän diplomityön tutkimusongelmana oli selvittää millainen moduulikokoonpanon tuotantojärjestelmän tulisi olla. Tutkimusongelman alatavoitteiksi asetettiin: varioituvan rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmän ominaisuuksien määrittely; talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttävän layoutin suunnittelu tehtaalle; työasemien työtehtävien ja materiaalikäsitteilyn organisointi tehokkaasti, hukkia minimoiden sekä moduulikokoonpanon tasapainotus ja aikataulutus.

Moduulituotantoprosessi on määritelty luvussa 5. Sen ja teorian perusteella on luvussa 6.1.3 esitetty rakennusmoduulivalmistuksen tuotantojärjestelmältä vaaditut ominaisuudet. Talonrakennustoiminnan vaatimukset täyttäviä layout -vaihtoehtoja on suunniteltu luvussa 6.2. Luvussa 6.3. on esitelty vaihtoehtoisia tapoja organisoida työtehtävät ja materiaalinkäsittely. Moduulikokoonpanon tasapainotuskeinoja ja lopullista aikataulutusta on esitelty luvussa 6.4. Kehitettyjä vaihtoehtoja ja niiden vastaavuutta vaadittuihin ominaisuuksiin on vertailtu luvussa 6.5. Tämän perusteella on luvussa 7 esitetty millainen moduulikokoonpanon tuotantojärjestelmä voisi olla. Voidaan siis todeta, että tutkimustavoitteet on tässä diplomityössä saavutettu.

Työn lähdeaineistona toimivat kirjat, tieteelliset artikkelit sekä kohdeyrityksen moduulituotannossa suoritettu havainnointi ja datankeräys. Kirjallisen lähdemateriaalin määrä painottuu jälkimmäiseen teollisen rakentamisen -teorialukuun, joka toimii työn syvemmin tutkittuna teoriaosuutena. Kirjallisuustutkielman perusteorioiden pohjana toimivat jopa 1970-luvulta lähtöisin olevat artikkelit ja kirjat, joihin viitataan monissa tuoreemmissa teoksissa. Toisaalta tuoreita tutkimustuloksia ja näkökulmia tuovat 2000-luvulta ja jopa vuosilta 2012 ja 2013 peräisin olevat artikkelit ja konferenssijulkaisut. Kirjallisuustutkielman lähteissä esiintyy toisiaan tukevia ja toisaalta myös toisistaan poikkeavia mielipiteitä ja johtopäätöksiä. Kirjallisuustutkielmassa käytetyt lähteet muodostavat näin laaja-alaisen otoksen alan tutkimuksesta tämän työn teorian lähtökohdaksi.

Suoritettu havainnointi ja datankeräys rajoittuvat rakennusmoduulituotannon osalta vain yhteen kohdeyritykseen. Tutkimuksen sovellettavuutta lisäisi useammassa yrityksessä suoritettu havainnointi ja tiedonkeräys, vaikka siinä tapauksessa niiden laajuutta tulisi pienentää. Kohdeyrityksessä suoritetusta havainnoinnista ja datankeräyksestä saatu lähdemateriaalin määrä on suuri. Tiedonkeräystä vaikeutti osaltaan se, ettei aikaisempaa dataa esimerkiksi vaiheajoista juuri ollut olemassa. Työn lähdemateriaalina käytetyllä kerätyllä datalla on rajoitteensa. Vaikka kerätty data on linjassa kohdeyrityksen omien havaintojen ja toisaalta rakennusalan standardien kanssa, parantaisi laajempi työntutkimus sen tieteellistä hyödynnettävyyttä. Laajemmalla työntutkimuksella tarkoitetaan useampia mittauksia vaihtuvissa olosuhteissa.

Tutkimusmetodina yksittäinen tapaustutkimus sopi tähän työhön ja kohdeyrityksen tarpeisiin hyvin. Kirjallisuuskatsaus sekä empiirinen havainnointi ja tiedonkeräys tukivat toisiaan ja niiden avulla pystyttiin luomaan uusia kohdeyritykselle sopivia ratkaisuja. Lisäksi benchmarking -yrityksissä tehdyt havainnot osoittivat mihin suuntaan tuotanto voisi tulevaisuudessa kehittyä. Kuten jo aiemmin mainittiin, havainnointia olisi kuitenkin voinut suorittaa myös useammissa teollisen rakentamisen yrityksissä. Lisäksi työntutkimuksen metodeja voisi kehittää tässä tutkimuksessa käytetyistä, esimerkiksi lisäämällä mittauksia, ottamalla käyttöön videokuvausmittauksen ja jakamalla mitattavia työvaiheita pienempiin osiin, jolloin saataisiin lisää tarkkuutta tuloksiin.

Työn rajausta osoittautui jo alkuvaiheessa haastavaksi. Vaikka rajausten tiukentaminen olisi lisännyt työn ydinasian esilletuloa, onnistui työn rajausta moduulikokoonpanoon melko hyvin. Mikäli rajausta olisi tiukennettu, olisi useamman yrityksen tutkiminen ollut mahdollista. Toisaalta tällä rajauksella vastattiin kohdeyrityksen tarpeisiin.

8.3. Tieteelliset havainnot

Vaikka teollisesta rakentamisesta on tehty etenkin lähivuosina paljon tutkimusta, on lisätutkimuksen tarve yleisesti todettu (Ballard et al. 2001; Sorri et al. 2013; Koskela 2003; Linner & Bock 2012). Yksi näistä osa-alueista on rakennusprosessit (Sorri et al. 2013, s. 1). Rakentamisen teollistumisen on myös sanottu kärsineen olemassaolevan tuotannon teorian suppeudesta (Koskela 2003, s. 91). Moduulituotannon suunnittelusta on tehty hyvin vähän tutkimusta ja vaikka teollisen rakentamisen asema tuotannon ja rakentamisen välissä on todettu, ei käytäntöön sovellettavaa mallia näiden yhdistämiseksi suunnittelussa löydy. Tässä diplomityössä onkin tutkittu rakennusmoduulituotantoa ja sen yhteyttä perinteiseen teolliseen tuotantoon. Työn kirjallisuustutkielman pohjalta on luotu moduulikokoonpanon tuotantojärjestelmän suunnitteluprosessimalli (luku 4.2.). Mallissa on huomioitu mitä ominaisuuksia teollisen rakentamisen prosessiin tulee omaksua teollisesta tuotannosta ja toisaalta rakentamisesta. Tämä työ edustaa harvinaista tutkimusaluetta. Tutkimuksen aikana suoritussa kirjallisuus- ja artikkelikatsauksessa ei vastaavanlaista julkaisua löytynyt.

Teoriassa esitetyt perinteiset tehdassuunnitteluprosessimallit ja rakennusmoduulitehdassuunnittelumallit olivat hyvin samankaltaisia toisiinsa verrattuna. Tämä tukee ajatusta, että teollinen rakentaminen muistuttaa enemmän teollista tuotantoa kuin rakentamista. Tuotantojärjestelmän suunnittelussa huomioitavat painotusalueiden erot taas johtuvat pääosin teollisen rakentamisen yrityksen sidosryhmistä ja perinteisen rakentamiskulttuurin vahvasta asemasta. Mielenkiintoinen huomio kirjallisuustutkimuksista olikin niissä havaittu piirre, että yritykset, joiden tausta ei ole rakentamisessa, ovat yleisesti pärjänneet paremmin teollisen rakentamisen toimialalla, kuin perinteisen rakentamisen taustan omaavat yritykset. Tämän suhteen voidaan myös epäillä rakennusyhtiöiden johdon sitoutumista uuteen, kysynnältään vielä epävarmaan yrityksen sivuliiketoimintaan, mikä johtaa helposti kärsimättömyyteen tulosten suhteen.

Teoriassa (luku 3.2.3.) esitettyjä teollisen ja modulaarisen rakentamisen ongelmakohtia oli havaittavissa myös tämän tutkimuksen kohdeyrityksen toiminnassa. Vaikka rakennusprosessin kestoa on saatu lyhennettyä, ei moduulituotannossa ole pystytty vielä hyödyntämään kaikkia teollisen rakentamisen tarjoamia etuja. Innovatiivisella teräskennoratkaisulla on pystytty löytämään kilpailuetua, mutta muilta osin moduulituotanto on ollut vielä pääosin perinteisen rakentamisen kaltaista, niin sanottua sisätiloissa rakentamista. Tämä on johtunut muun muassa selkeän teollisen tuotantoprosessin puutteesta, johon syyksi voidaan epäillä perinteisen rakentamisen kulttuurin vaikutusta niin kohdeyritykseen kuin sen sidosryhmiin, ja toisaalta kysynnän hidasta kasvua, mikä ei ole

asettanut suuria tuotantomääräodotuksia. Kohdeyrityksen taustat ovat laivanrakentamisessa eli teollinen tuotantoympäristö on sille tuttu ympäristö. Kohdeyrityksen toimintatavoissa onkin nähtävissä halukkuus pyrkiä kohti uusia, innovatiivisia ja tehokkaita ratkaisuja. Moduulituotannon kohdalla tämä tarkoittaa perinteisen rakennusprosessin uudistamista uusia työmenetelmiä hyödyntäväksi tehokkaaksi ja virtaavaksi rakennusmoduulituotannoksi.

8.4. Huomioita tutkimuksen tekemisestä ja jatkotutkimuskohteet

Tutkimuksen alussa teollisen rakentamisen toimiala oli havainnoijalle uusi ympäristö, samoin kuin rakentaminen yleensäkin. Tutkimuksen tekijän taustat ovat teollisen tuotannon puolelta, mikä tarjosi tutkimukseen ulkopuolisen tarkastelijan näkökulman. Tutkimus aloitettiin tutustumalla teoriaan ja taustoihin sekä hyvin pian tämän jälkeen kohdeyritykseen. Työtä varten suoritettu havainnointi ja työntutkimus veivät yllättävän paljon aikaa. Tähän vaikutti varmasti osaltaan täysin uusi ympäristö. Toisaalta voidaan ajatella, että tuotannossa tehdyn havainnoinnin määrä nostaa tämän työn arvoa etenkin yrityksen kannalta, koska työntutkimusta on kohdeyrityksen toimesta suoritettu aiemmin hyvin vähän. Mielenkiintoinen huomio on se, että havainnoinnin aikana havainnoitsijan rooli muuttui yhä enemmän sisäiseksi havainnoitsijaksi, sillä tuotannossa ja työntekijöiden kanssa vietetty aika tutustutti yrityksen sisäisiin ajatusmalleihin.

Kerätyn tiedon ja teorian perusteella luotiin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja tutkimusongelmaan. Lisäksi näitä vaihtoehtoja vertailtiin keskenään. Tavoitteena oli, että tämän työn lukijat voisivat myös itse luoda omia vaihtoehtoja tai vertailla tässä esitettyjä, käyttäen samoja menetelmiä kuin työssä on käytetty eli, että vaihtoehtojen kehittämis- ja vertailuprosessit olisivat mahdollisimman läpinäkyviä. Kirjoittajan on vaikea objektiivisesti arvioida tämän onnistumista, mutta taulukoiden ja kuvaajien suuri määrä liitteissä edellyttää varmasti lukijalta paneutumista tutkijan ajatuksenkulun selvittämiseksi. Toisaalta tarkastellussa olleen moduulituotantoprosessin työvaiheiden määrä ja kompleksisuus osaltaan edellyttivät tätä.

Tehty diplomityö on käsittelytasoltaan melko yleisluonteinen. Tutkimustavoite piti sisällään tuotantojärjestelmän suunnittelun, eikä tarkoitus ollut alun perinkään tehdä tiettyyn tuotannon osa-alueeseen tarkasti syventyvää tutkimusta. Työn yleisluonteisuus kuitenkin hankaloitti työn tekemistä ajoittain, sillä työhön kuuluvien asioiden rajaaminen ei ollut yksiselitteistä, ja vaarana oli työn pääasian hukkuminen.

Tämän työn yksi funktio voisi olla jatkotutkimuskohteiden pohjana toimiminen. Tämän työn perusteella esitettyjä jatkotutkimuskohteita rakennusmoduulituotantoon liittyen voisivat olla esimerkiksi moduulitehtaan työasemien toiminta, varastohallinta, toiminnanohjausjärjestelmän käyttöönotto, tuotesuunnittelun ja tuotannon yhteistyö, kehitetyn tuotantojärjestelmän implementointi tai tuoterakenteen modulointi.

LÄHTEET

- Akagi, F., Osaki, H. & Kikuchi, S. 1983. A Method for Assembly Line Balancing with More than One Worker in Each Station. *International Journal of Production Research*. Vol. 21(5), ss. 755–770.
- Arif, M., Goulding, J. & Rahimian, F. 2012. Promoting Off-Site Construction: Future Challenges and Opportunities. *Journal of Architectural Engineering*. Vol. 18(2), ss. 75–78.
- Baker, K., Powell, S. & Pyke, D. 1993. Optimal Allocation of Work in Assembly Systems. *Management Science*. Vol. 39(1), ss. 101–106.
- Baldwin, A., Poon, C., Shen, L., Austin, S. & Wong, I. 2009. Designing out Waste in High-Rise Residential Buildings: Analysis of Precasting Methods and Traditional Construction. *Renewable Energy*. Vol. 34(9), ss. 2067–2073.
- Ballard, G., Koskela, L., Howell, G. & Zabelle, T. 2001. Production System Design in Construction. *Proceedings of the 9th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Singapore, August 2013, Lean Construction Institute, ss. 1–15.
- Barlow, J., Childerhouse, P., Gann, P., Hong-Minh, S., Naim, M. & Ozaki, R. 2003. Choice and Delivery in Housebuilding: Lessons from Japan for UK Housebuilders. *Building Research & Information*. Vol. 31(2), ss. 134–145.
- Bartholdi, J. 1993. Balancing Two-Sided Assembly Lines: A Case Study. *International Journal of Production Research*. Vol. 31(10), ss. 2447–2461.
- Bartholdi, J. & Eisenstein, D. 1996. A production line that balances itself. *Operations Research*. Vol. 44(1), ss. 21–34.
- Baudin, M. 2002. *Lean Assembly – The Nuts and Bolts of Making Assembly Operations Flow*. New York, Productivity Press, cop. 273 s.
- Becker, C. & Scholl, A. 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*. Vol. 168(3), ss. 694–715.
- Björnfot, A. & Stehn, L. 2004. Industrialization of Construction – A Lean Modular Approach. *Proceedings of the 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Copenhagen, August 2004, ss. 1–14.
- Blismas, N. & Wakefield, R. 2009. Drivers, Constraints and the Future of Offsite Manufacturing in Australia. *Construction Innovation*. Vol. 9(1), ss. 72–83.
- Bukchin, J. 1998. A Comparative Study of Performance Measures for Throughput of a Mixed Model Assembly Line in a JIT Environment. *International Journal of Production Research*. Vol. 36(10), ss. 2669–2685.
- Bukchin, J. & Masin, M. 2004. Multi-objective Design of Team Oriented Assembly Systems. *European Journal of Operational Research*. Vol. 156(2), ss. 326–352.
- Bukchin, J., Dar-El, E. & Rubinovitz, J. 2002. Mixed Model Assembly Line Design in a Make-to-Order Environment. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 41(4), ss. 405–421.
- Gann, D. 1996. Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. *Construction Management and Economics*. Vol. 14(5), ss. 437–450.
- Gerth, R. 2008. *En företagsmodell för modernt industriellt byggande*. Licentiatavhandling. Stockholm, Kungliga tekniska Högskolan, Skolan för industriell teknik och management. 104 s.

- Gibb, A. 2001. Standardisation and Pre-assembly – Distinguishing Myth from Reality Using Case Study Research. *Construction Management and Economics*. Vol. 19(3), ss. 307–315.
- Girmscheid, G. 2010. Context of Industrialisation – Introduction. Girmscheid, G & Scheublin, F. (toim.). *New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report*. Zürich, IBB – Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ss. 3–13.
- Girmscheid, G. & Scheublin, F. 2010. Introduction. Girmscheid, G & Scheublin, F. (toim.). *New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report*. Zürich, IBB - Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ss. vii–ix.
- Heike, G., Ramulu, M., Sorenson, E., Shanahan, P. & Moinszadeh, K. 2001. Mixed Model Assembly Alternatives for Low-Volume Manufacturing: The Case of the Aerospace. *International Journal of Production Economics*. Vol. 72(2), ss. 103–120.
- Heinisuo, M. & Lahdenmaa, J. 2013. Rakenteet. Sorri, J. (toim.). *Moduulirakentaminen: teräskenteeknologian mahdollisuudet*. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, ss. 26–51.
- Heizer, J. & Render, B. 2013. *Operations Management – Sustainability and Supply Chain Management*. Eleventh Edition, Harlow, Pearson Education Limited. 798 s.
- Henrich, G. & Koskela, L. 2005. Production Management in Construction – Requirements and Methods. 2nd Scottish Conference for Postgraduate Researchers of the Built & Natural Environment, Glasgow, November 2005, ss. 1–9.
- Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 1997. Tutki ja kirjoita. Keuruu, Kustannusosakeyhtiö Tammi. 448 s.
- Hopp, W., Spearman, M. & Woodruff, D. 1990. Practical Strategies for Lead Time Reduction. *Manufacturing Review*. Vol. 3(2), ss. 78–84.
- Höök, M. & Stehn, L. 2008. Applicability of Lean Principles and Practices in Industrialized Housing Production. *Construction Management and Economics*. Vol. 26(10), ss. 1091–1100.
- Johnsson, H. & Meiling, J. 2009. Defects in offsite construction: timber module prefabrication. *Construction Management and Economics*. Vol. 27(7), ss. 667–681.
- Kazi, A., Eichert, J. & Boudjabeur, S. 2009. Open Building Manufacturing. *ManuBuild. System Handbook*. 119 s.
- Koskela, L. 2003. Is Structural Change the Primary Solution to the Problems of Construction? *Building Research & Information*. Vol. 31(2), ss. 85–96.
- Krajewski, L., Ritzman, L. & Malhotra, M. 2010. *Operations Management – Processes and Supply Chains*. Ninth Edition, New Jersey, Pearson Education, Inc. 672 s.
- Liker, J. 2004. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York, McGraw-Hill. 330 s.
- Linner, T. & Bock, T. 2012. Evolution of Large-Scale Industrialisation and Service Innovation in Japanese Prefabrication Industry. *Construction Innovation*. Vol. 12(2), ss. 156–178.
- Lovelle, J. 2001. Mapping the Value Stream. *IIE Solutions*. Vol. 33(2), ss. 26–33.
- Modulaarinen rakentaminen FIXCEL teräskenteeknologialla. Elokuu 2012. Helsinki, NEAPO Oy. Esitelmä. 54 s.
- Mullens, M. 2011. *Factory Design for Modular Homebuilding: Equipping the modular factory for success*. Winter Park, Constructability Press. 252 s.
- Muther, R. 1973. *Systematic Layout Planning*. Second Edition, Boston, CBI Publishing Company, Inc.
- Mäki, T., Olenius, A. & Koskenvesa A. 2003. *Aikataulukirja* 2004. Tampere, Rakennusteollisuus RT ry & Rakennustietosäätiö RTS. 340 s.

- Nadim, W. & Goulding, J. 2011. Offsite Production: a Model for Building Down Barriers: A European Construction Industry Perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Vol. 18(1), ss. 82–101.
- Nam, C. & Tatum, C. 1988. Major characteristics of constructed products and resulting limitations of construction technology. *Construction Management and Economics*. Vol. 6(2), ss. 133–148.
- NCC Komplet – A technological Leap for Lean House Production. 25.10.2007. NCC. Esitelmä. 28 s.
- NCC 22.11.2007. NCC komplett -kehitysprojekti päättyy. [<http://www.ncc.fi/fi/Tietoa-NCCsta/Uutiset-2007/NCC-Komplett-kehitysprojekti-paattyi/>]. Luettu 26.2.2013.
- NCC 25.4.2006. NCC launches world-leading residential production plant. [<http://news.cision.com/ncc/r/ncc-launches-world-leading-residential-production-plant,c207997/>]. Luettu 26.2.2013
- NEAPOn yleisesittely. Tammikuu 2013. Helsinki, NEAPO Oy. Esitelmä. 29 s.
- NEAPO Oy. 2012. Referenssit. [<http://www.neapo.fi/fi/www/popupcard.php?id=35>]. Luettu 23.01.2013.
- Palomäki, J., Mäki, T. & Koskenvesa, A. 2009. Rakennustöiden menekit 2010. Viro, Talonrakennusteollisuus ry & Rakennustietosäätiö RTS. 149 s.
- Pan, W. & Goodier, C. 2012. House-Building Business Models and Offsite Construction Take-Up. *Journal of Architectural Engineering*. Vol. 18(2), ss. 84–93.
- Pan, W., Dainty, A. & Gibb, G. 2012. Establishing and Weighting Decision Criteria for Building System Selection in Housing Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. Vol. 138(11), ss. 1239–1250.
- Richard, R-B. 2005. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*. Vol. 14(4), ss. 442–451.
- Richard, R-B. 2010a. Five Degrees of Industrialised Building Production. Girmscheid, G & Scheublin, F. (toim.). *New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report*. Zürich, IBB - Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ss. 15–27.
- Richard, R.-B. 2010b. Generic Classification of Industrialised Building Systems. Girmscheid, G & Scheublin, F. (toim.). *New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report*. Zürich, IBB - Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ss. 303–316.
- Roy, R., Low, M. & Waller, J. 2005. Documentation, Standardization and Improvement of the Construction Process in House Building. *Construction Management and Economics*. Vol. 23(1), ss. 57–67.
- Sarker, B. & Pan, H. 1998. Designing a Mixed-Model Assembly Line to Minimize the Costs of Idle and Utility Times. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 34(3), ss. 609–628.
- Saunders, M., Lewis, P. & Thornhill, A. 2009. *Research methods for business students Fifth Edition*, Harlow, Pearson Education Limited. 614 s.
- Schuster, G. Experiences from Japan for industrialized housing production. *Sustain Consulting*. Esitelmä. 67 s.
- Simonsson, P. & Emborg, M. 2009. Increasing Productivity Through Utilization of New Construction Techniques and Lean Construction Philosophies in Civil Engineering Projects. *Nordic Concrete Research Publication*. Vol. 39 (1), ss. 53–74.
- Smith, R. & Hulsberg, D. 2008. Lean Architecture: Toyota Home Project. Without a Hitch: New Directions in Prefabricated Architecture. *Proceedings of the 2008 ACSA Northeast Fall Conference*, University of Massachusetts Amherst, September 2013, ACSA, ss. 178–184.
- Smith, R. 2010. *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc. 366 s.

- Sorri, J. & Kähkönen, K. 2013. Modulaarinen rakentaminen yritysverkoston toteuttamana. Sorri, J. (toim.). Moduulirakentaminen: teräskennoteknologian mahdollisuudet. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, ss. 64–69.
- Sorri, J., Kähkönen, K. & Rannisto, J. 2013. Construction Business with Innovative Cellular Structures, Modules and buildings. Proceedings of the CIB 2013 World Building Congress, Brisbane, May 2013, CIB, ss. 1–12.
- Stephens, M. & Meyers, F. 2010. Manufacturing Facilities Design and Material Handling. Fourth Edition, New Jersey, Pearson Educational, Inc. 486 s.
- Stevenson, W. 2009. Operations Management. Tenth Edition, New York, McGraw-Hill Companies, Inc. 884 s.
- Teknologiaeollisuus. 2012 Työntekijöiden vuosityöaika. [http://www.teknologiaeollisuus.fi/fi/tyomarkkina-asiat/new-page-3133.html]. Luettu 17.4.2013.
- Wadhwa, S., Rao, K. & Chan, F. 2005. Flexibility-enabled lead-time reduction in flexible systems. International Journal of Production Research. Vol. 43(15), ss. 3131–3162.
- Van Egmond-de Wilde de Ligny, E. 2010. Conditions for Industrialisation and Innovation in Construction. Girmscheid, G & Scheublin, F. (toim.). New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report. Zürich, IBB - Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ss. 67–75.
- Wegelius, P. 2012. Tuotantojohtaja, NEAPO Oy. Helsinki. Haastattelu 17.11.2012.
- X1. 2013. Tuotantopäällikkö, Yritys X1. Tampere. Vierailu 4.4.2013.
- X2. 2013. Tuotannon suunnittelupäällikkö, Yritys X2. Joensuu. Vierailu 10.4.2013.
- Zavadlav, E., McClain, J. & Thomas, J. 1996. Self-buffering, Self-balancing, Self-flushing Production Lines. Management Science. Vol. 42(8), ss. 1151–1164.

LIITTEET (32 kpl)

Tutkimusta varten suoritettu havainnointi				
Pvm	Klo	H	Havainnoinnin päähuomio	Havainnoinnin kohde
12.11.2012	9-16	7	Tuotantoon tutustuminen	A-talon moduulit
13.11.2012	9-17	8	Tuotantoon tutustuminen	A-talon moduulit
14.11.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
15.11.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
16.11.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
21.11.2012	9-17	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
22.11.2012	7-15	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
27.11.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
29.11.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
4.12.2012	9-16	7	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
5.12.2012	9-16	7	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
12.12.2012	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A-talon moduulit
20.12.2012	8-15	7	Työvaiheiden keruu	A- ja D-talojen moduulit
9.1.2013	8-16	8	Työvaiheiden keruu	A- ja D-talojen moduulit
17.1.2013	9-17	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
22.1.2013	9-17	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
23.1.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
29.1.2013	9-15	6	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
5.2.2013	9-17	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
6.2.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
7.2.2013	8-12	4	Moduulien asennus työmaa	A-talo
11.2.2013	9-17	8	Vaiheaikojen keruu	A- ja D-talojen moduulit
12.2.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	A-, D- ja B-talot
20.2.2013	8-15	7	Vaiheaikojen keruu	A-, D- ja B-talot
25.2.2013	12-16	4	Vaiheaikojen keruu	D- ja B-talot
26.2.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	D- ja B-talot
5.3.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	D-, B- ja C-talot
19.3.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	B- ja C-talot
26.3.2013	8-16	8	Vaiheaikojen keruu	B- ja C-talot
4.4.2013	9-11	2	Metso Minerals Tampere	
10.4.2013	12-14	2	John Deere Joensuu	
Yhteensä		221,00		

Haastattelut ja keskustelut:

Carl Hietala, NEAPO Oy

Jarmo Lampinen, NEAPO Oy

Työnjohto: Veli-Matti Laaksonen, Tommi Konttila Oy Shippax Ltd

Tuotannon urakoitsijat: LV: Joni Halttunen, TeamKopling Oy; Rakenteet: Henry Varha, Hemiva Oy; Märkätilat: Toni Lahtivuori, PaxTeam Oy; IV: Valton Bunjakuv, KSOil-mastointi Oy

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
Kövalhe 1	9.1.	20.11.	9.1.	20.11.	13.11.	20.11.	25.11.	9.1.	19.12.	19.12.	11.12.	9.1.	26.11.	28.11.
Kövalhe 2	9.1.	9.1.	9.1.	25.11.	14.11.	20.11.	21.11.	17.1.	19.12.	19.12.	19.12.	19.12.	27.11.	5.12.
Kövalhe 3	9.1.	9.1.	9.1.	3.12.	3.12.	3.12.	3.12.	9.1.	9.1.	9.1.	19.12.	19.12.	19.12.	5.12.
Kövalhe 4	17.1.	11.12.	9.1.	19.12.	11.12.	11.12.	11.12.	17.1.	9.1.	9.1.	9.1.	20.12.	19.12.	11.12.

Runkotyöt	
	Lattian kokoaminen
	Seinien kasa
	LVI-kuilun teko
	Väliseinien asennus
Puukattotyöt	
	Kattorakenteiden valmistus
	Kattorakenteen paikoilleenasennus
	Ylimmän kerroksen kattoeristeet
	Kattolaudoitus ja huovutus
Sisustus	
	Alaslaskettujen kattojen teko ja levytys
	Seinien kipsilevytys
	Lattian kipsilevytys
	Märkätilojen levytys
	Kylpyhuoneen vesieristys
	Viemärin valu, lattialämmitys ja lattiakaato
	Kylpyhuoneen kaakelointi
	Tasoitetyöt
	Lattiamaton tms. asennus
	Maalaus
	Kylpyhuoneen kiinteät kalusteet
	Kylpyhuoneen alaslaskettu katto
	Sisäovien asennus
	Ikkunoiden ja ovien asennus
	Vaatekaappien asennus
	Keittiön kalusteasennus ja kaakelointi
	Listojen asennus
LVIS-työt	
	Läpiviennit LVIS-putkille ja -johdoille
	Viemärien teko
	LVI-kuilun asennus
	Sähköjohtojen veto
	Ilmastointikanavien asennus
	Vesi- ja lämpöputkien paikoilleenasennus
	IV-koneen ja -venttiilien asennus
	Pistorasioiden, valaisimien ja sähkökaapin asennukset
	Vesikalusteiden kytkennät
	Lämpöpatterien asennus
	Kodinkoneiden asennus
Ulkovuoraus	
	Koko asunnon höyrysulku
	Alimman kerroksen höyrysulku ja pohjaeristeet
	Paloeristeiden asennus
	Lämpöeristeiden asennus
	Limutus

[illegible]

Vesi- ja lämpöputkien paikoilleenasennus



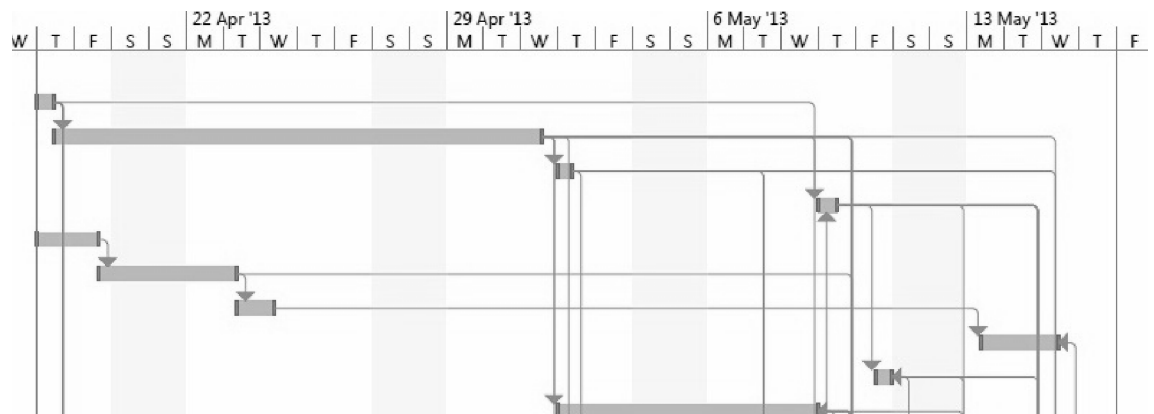
- Edeltävät tehtävät:
 - Lattiarakenne
 - Seinärakenteet (joiden sisään putket tulevat)
 - Lattian levytys (start-start)
- Kesto (tth/moduuli): 2

Vaiheaikamittaukset (tth = työntekijätuntia, "arvio" = ammattimiehen antama arvio työn kestosta, "mitattu XXX" = mittaus tehty tuotannossa merkitsemällä ylös aloitusaika ja lopetusaika)						
Päivämäärä	Työvaihe	Kesto tth	Suoritemäärä	Kesto tth/mod.	Lähde	
17.1.13	Työvaihe 1		2,0 1 moduuli	2,0	Mitattu A4	
17.1.13	Työvaihe 2		45,0 1 moduuli	45,0	Mitattu A-talo	
17.1.13	Työvaihe 3		6,0 1 moduuli	6,0	Mitattu D-talo	
22.1.13	Työvaihe 4		8,0 1 moduuli	8,0	Arvio	

Työvaihe	Oma mittaus	RT tth/m ² jollei toisin mainita	Ala / määrä	RT / moduuli	Käytettävä aika (tällä hetkellä tilanne)	Kommentti	Moduulin pinta-alan vaikutus
Työvaihe 1	5	8	0,5	4	4,5		Ei juurikaan
Työvaihe 2	45	2	25	50	45		Kyllä
Työvaihe 3	8	0,5	20	10	9		Ei, sama joka moduulissa
Työvaihe 4	9	0,63	6,56	4,1328	7		Kyllä

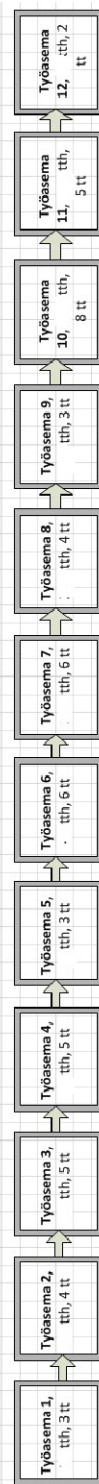
[illegible]

	A6	A7	A13	A14	
Työvaihe 1	5	5	6	6	
Työvaihe 2	45	45	50	50	
Työvaihe 3	2	2	3	3	
Työvaihe 4	5	6	7	7	

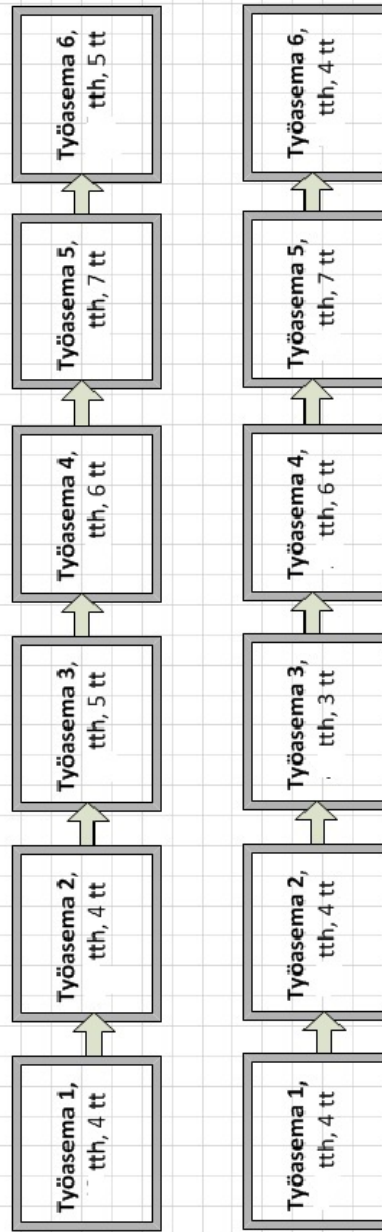


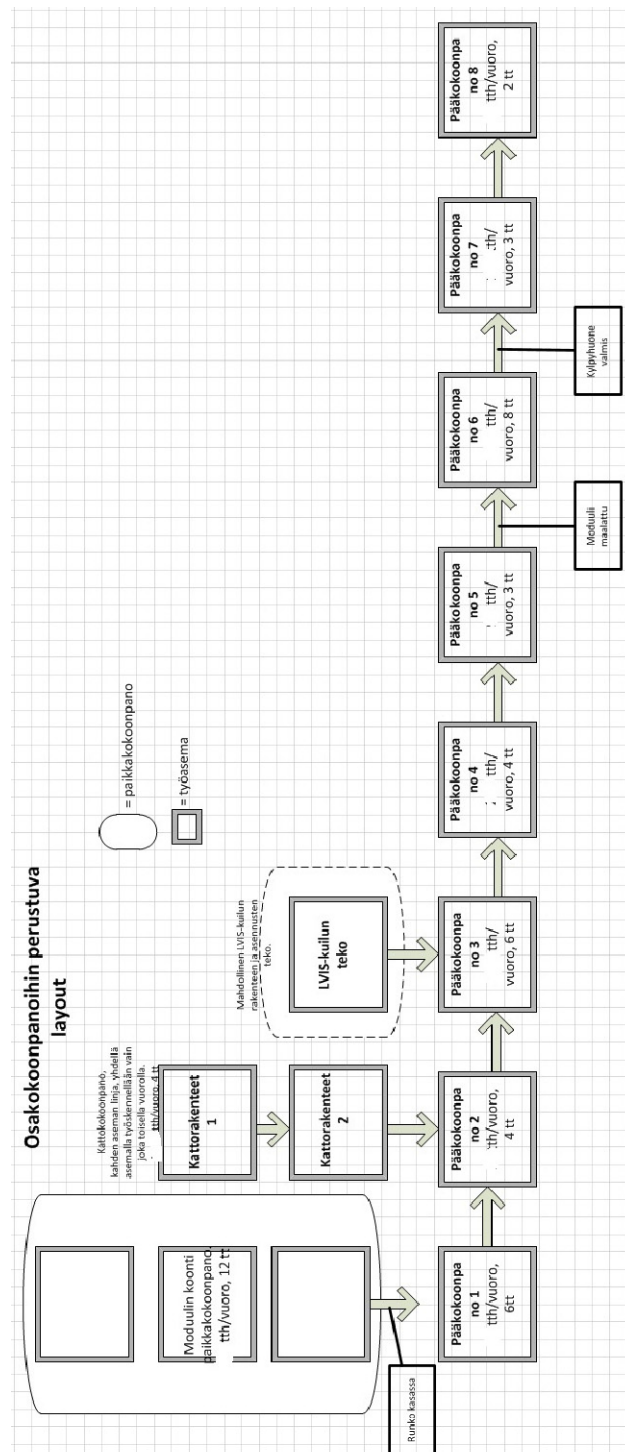
A6 Asemat 1-5				
1 aika	2 aika	3 aika	4 aika	5 aika
Lattian kokoaminen Seinien kokoaminen			Levyys Lattioiden levyys	Sähköjohtojen veto Ilmastointikanavien asennus Kylpyhuoneen vesieristys
	Viemäri		Kattorakenteiden teko	väliseinät
	Märkätilojen levyys Viemärinvalu, lattia-lämmitys ja levyys		kattorakenteiden palkkoilleen asennus Alimman kerroksen höyrysulku	Alasasketut katot
	Vesi- ja lämpöpötket putkiasennukset lvi kuluu			sähköasennukset lvi kuluu
				IV-asennukset lvi kuluu
Esimerkki tentävänjakotaulukosta, josta poistettu vaiheajoja ja työntekijämääriä				
2	1	8	5	7
Työntekijöiden lukumäärä	Työntekijöiden lukumäärä		Työntekijöiden lukumäärä	Työntekijöiden lukumäärä
Todellinen tarve	Todellinen tarve	Todellinen tarve	Todellinen tarve	Todellinen tarve
Lukumäärä: Työntekijät taidon mukaan	Lukumäärä: Työntekijät taidon mukaan	Työntekijät taidon mukaan	Työntekijät taidon mukaan	Työntekijät taidon mukaan
0 Sähkömies	0 Sähkömies	0 Sähkömies	0 Sähkömies	0 Sähkömies
0 Putkimies	0 Putkimies	0 Putkimies	0 Putkimies	0 Putkimies
0 Ilmastointimies	0 Ilmastointimies	0,71429 Putkimies	0,71429 Putkimies	0 Putkimies
0 Maalari/rajoittaja	0 Ilmastointimies	0 Ilmastointimies	0 Ilmastointimies	0 Ilmastointimies
Rakennus /y/eis/mies	0 Maalari/rajoittaja	0 Maalari/rajoittaja	0 Maalari/rajoittaja	0 Maalari/rajoittaja
Kaakeloitumies	6 Rakennus /y/eis/mies	6 Rakennus /y/eis/mies	3,5 Rakennus /y/eis/mies	4,71429 Rakennus /y/eis/mies
Työta per työntekijä keskimäärin	0 Kaakeloitumies	0 Kaakeloitumies	0,35714 Kaakeloitumies	0 Kaakeloitumies
6,333333	Työta per työntekijä keskimäärin	Työta per työntekijä keskimäärin	Työta per työntekijä keskimäärin	Työta per työntekijä keskimäärin
1,14286				
4,58333				

Kokoonpanolinja 12 asemaa

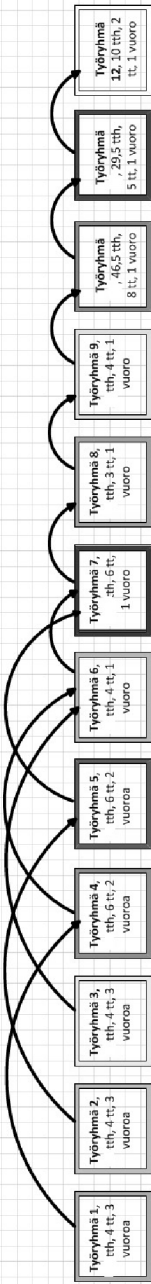


2 linjaa rinnakkain. Tahtiaika 2
työvuoroa.

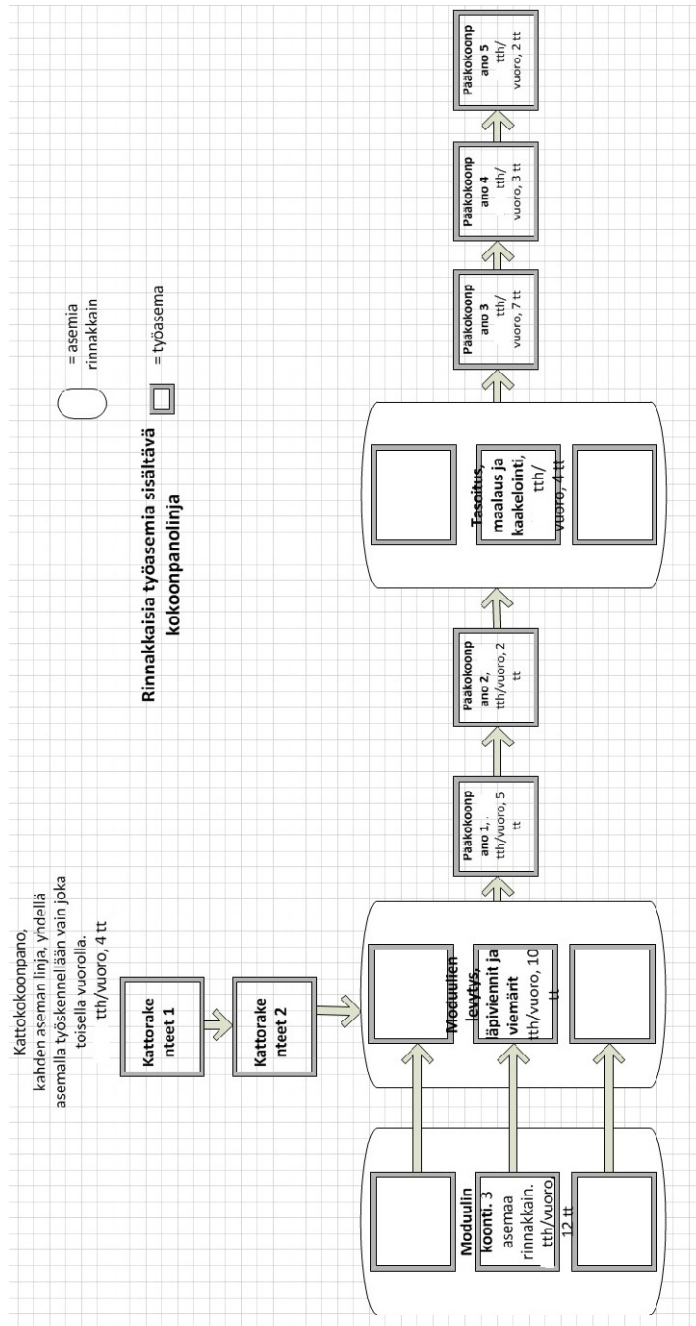




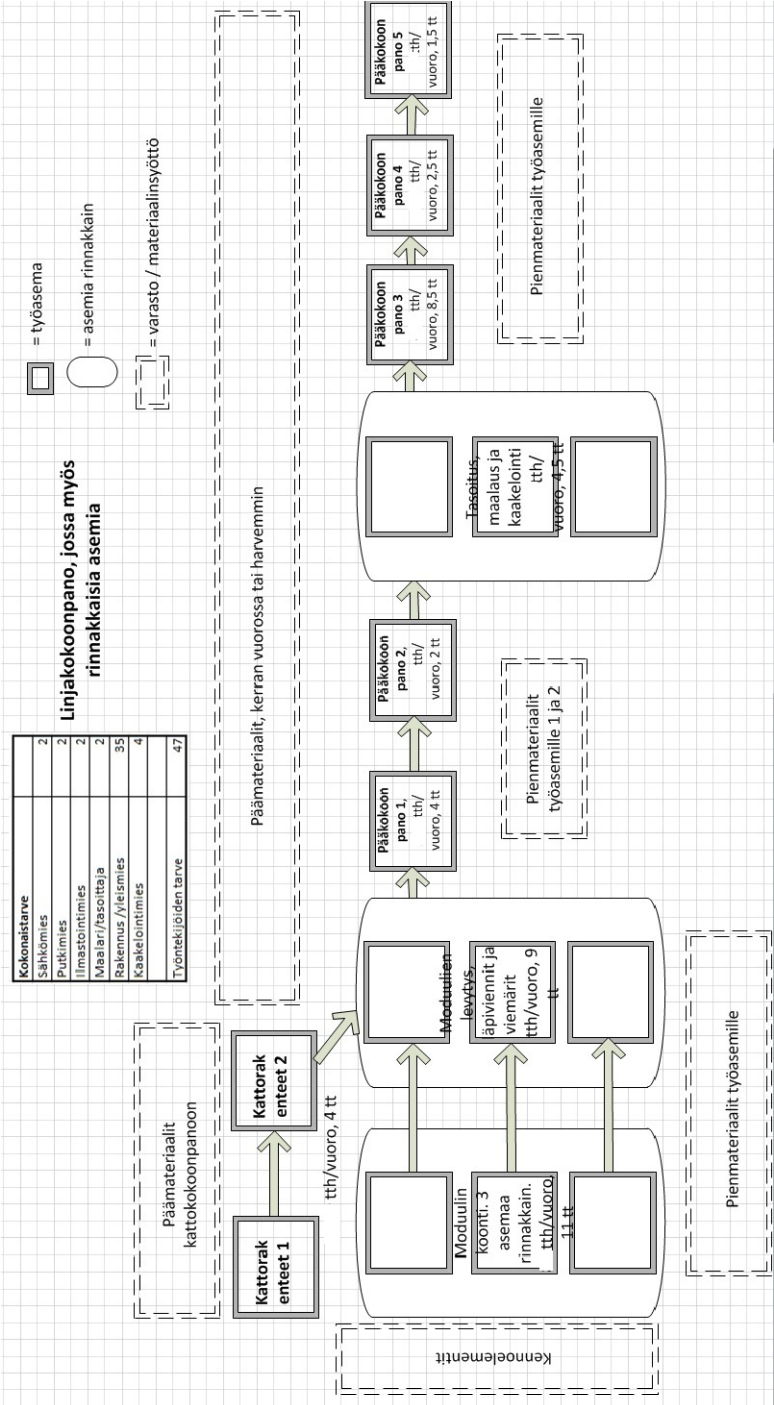
Työntekijöiden virtaus -
koonpanolinja

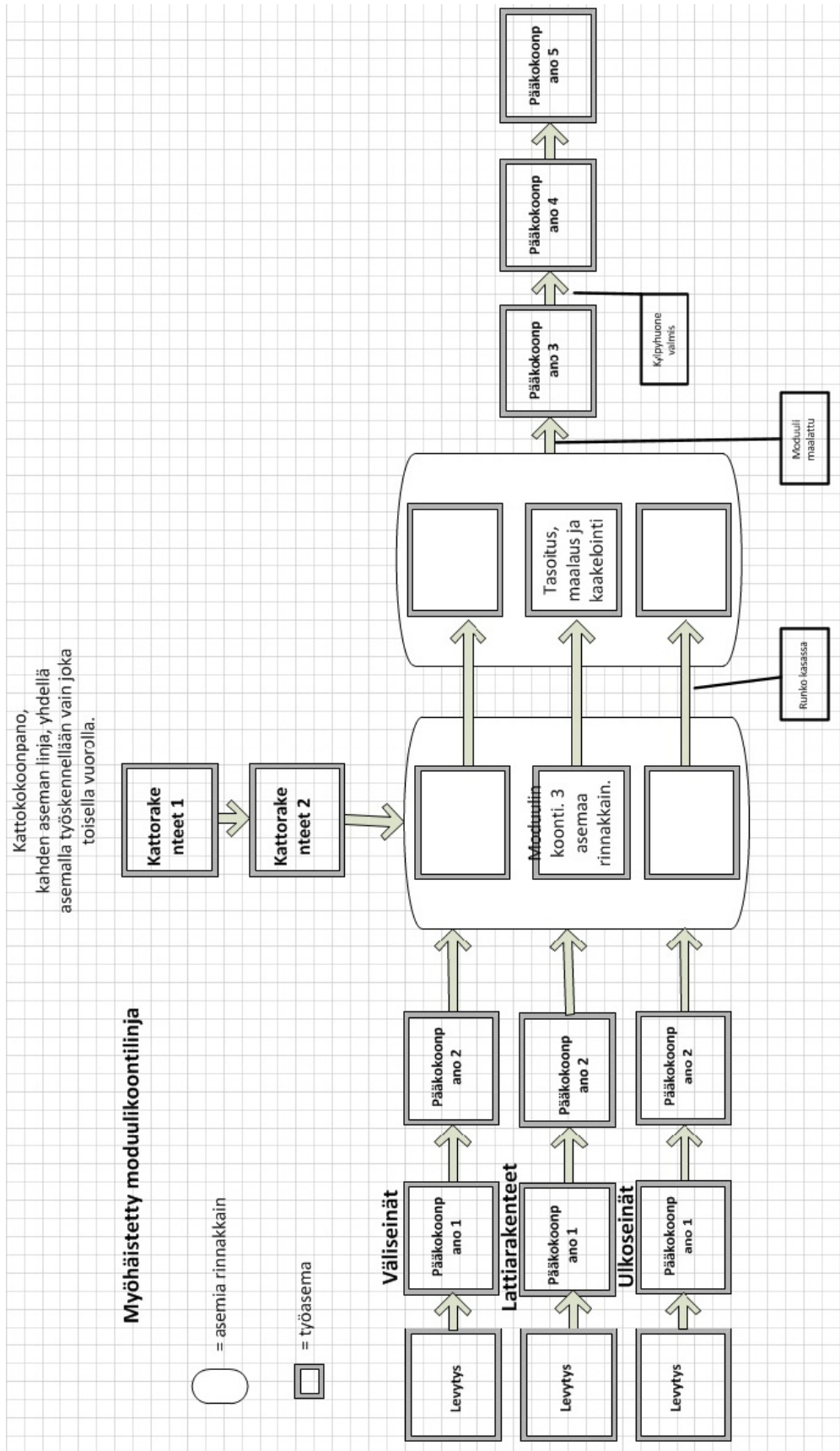


	Moduuli- paikka 1	Moduuli- paikka 2	Moduuli- paikka 3	Moduuli- paikka 4	Moduuli- paikka 5	Moduuli- paikka 6	Moduuli- paikka 7	Moduuli- paikka 8	Moduuli- paikka 9	Moduuli- paikka 10	Moduuli- paikka 11	Moduuli- paikka 12
Vuoro 1	Työryhmä 1	Työryhmä 12	Työryhmä 11	Työryhmä 10	Työryhmä 9	Työryhmä 8	Työryhmä 7	Työryhmä 6	Työryhmä 5	Työryhmä 4	Työryhmä 3	Työryhmä 2
Vuoro 2	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 3	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 4	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 5	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 6	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 7	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 8	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 9	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 10	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 11	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12
Vuoro 12	Työryhmä 1	Työryhmä 2	Työryhmä 3	Työryhmä 4	Työryhmä 5	Työryhmä 6	Työryhmä 7	Työryhmä 8	Työryhmä 9	Työryhmä 10	Työryhmä 11	Työryhmä 12



Osakokoonpano			
Työntekijät	Jakavat työasemat		
Putkimies	1	6	
Rakennusmies	2	3	
Kaakelointimies	1	3	
Ilmastointimies	3	8	
Kaakelointimies	4	7	
Työntekijöiden virtaus			
Työntekijät	Jakavat työryhmät		
Rakennusmies x	1	2	3
Putkimies	4	5	10
Kaakelointimies	4	5	7
Rakennusmies	6	7	
Ilmastointimies	7	12	
Kaakelointimies	9	11	
Rinnakkaisia sisältävä			
Työntekijät	Jakavat työasemat		
Ilmastointimies	1	5	
Kaakelointimies	1	4	
Putkimies	3	Levytys	
Rakennusmies	Koonti	Levytys	
Kaakelointimies	Levytys	Kaakelointi	





Myöhäistetty moduulikoontilinja						
Moduulin levytyks	1	2	Moduulin koonti	3	4	5
Moduulin levytyks	Ky/Pyhuoneen vesieristys	Sähköjohtojen veto	Lattian kokoaminen	Pistorasoiden, valaisimien ja sähkökeskusten asennukset	Keittion kalusteasennus ja kaake ointi	Listojen asennus
LV-kuilun teko	Ky/Pyhuoneen vesieristys	sähköasennukset lvi kuiluun	Seinien kokoaminen	Kylp kiinteät kalusteet	Vaatekaappien asennus	Liesituulettimen asennus
Läpiviennit	asennukset	Paloristeet		Alaslasketut katot	Lämpöeristeet	Viimeistelyt
Viemäri	IV-asennukset lvi kuiluun			Sisäovet	Kattolaudotus ja -huopa viimeistelyt	IV-koneen ja venttiilien
Märkätilojen levytyks				Kylp. Vesikalusteet		Mittaukset, koekäytöt
Viemäriputki, lattiälämmitys				Lämpöpatterien asennus		Jääläpän ja hellän asennus
Vesi- ja lämpöputket				Lattiamatto		
puhkaasennukset lvi kuiluun				Ilmastointikanavien asennus		
				Ky/Pyhuoneen alaslaskettu katto		